



UNIVERSIDAD DE CANTABRIA

Escuela Técnica Superior de Ingenieros de  
Caminos, Canales y Puertos



## Tesis Doctoral

DESARROLLO DE UN SISTEMA DE TRATAMIENTO DEL AGUA DE  
ESCORRENTÍA SUPERFICIAL PROCEDENTE DE APARCAMIENTOS  
IMPERMEABLES USANDO FLUJO ASCENDENTE Y GEOTEXTILES

Autor

ANDRÉS H. FERNÁNDEZ BARRERA

Directores

DANIEL CASTRO FRESNO

JORGE RODRÍGUEZ HERNÁNDEZ

Santander, Diciembre de 2009







*Dedicado a Cecilia por confiar en esta aventura,  
por su apoyo constante y por estar a mi lado.*

*Dedicado a todos los que compartieron  
con nosotros estos tres años.*

*Dedicado a todos aquellos que  
hicieron posible nuestro viaje.*



## RESUMEN DE LA TESIS

La incidencia de la contaminación difusa de la escorrentía en el medio natural ha motivado la promulgación de normativas que limiten los valores de los contaminantes presentes en los efluentes vertidos a los cuerpos receptores, tanto en países de Europa como en otros países del mundo. En forma paralela y complementaria, se han llevado a cabo diversos estudios de los valores de carga contaminante de la escorrentía superficial. Ambas condiciones han llevado al desarrollo de numerosos sistemas de depuración de las aguas de escorrentía superficial con el objetivo de reducir las cargas contaminantes que arrastra a niveles aceptables por la normativa. Esta tesis doctoral presenta la investigación del desarrollo de un prototipo de laboratorio de un sistema de captación, pretratamiento y tratamiento (SCPT) de la escorrentía proveniente de aparcamientos con firmes impermeables. Los componentes principales del SCPT son: la estructura principal, fabricada en metacrilato; la pantalla interior, que divide el cuerpo del SCPT en una zona de tapón hidráulico y otra zona de volumen de decantación; y el sistema de filtrado, compuesto por una o varias capas de geotextil y un sistema de sujeción. El prototipo de SCPT fue estudiado en condiciones de funcionamiento inicial, donde se ensayaron distintas configuraciones de los elementos que lo componen, observándose la respuesta del SCPT ante diferentes condiciones de caudales afluentes y cargas contaminantes de aceites y sólidos. Una vez fijada su configuración, se estudió su funcionamiento a largo plazo. Las respuestas estudiadas son las concentraciones de aceites y sólidos en el efluente y las eficiencias de depuración de dichos contaminantes. Finalmente, se analizó la capacidad del sistema de filtrado del SCPT para albergar colonias de microorganismos depuradores de hidrocarburos. Los niveles de depuración alcanzados por el prototipo de SCPT son superiores al 80% para el caso de los sólidos y al 90 % para los aceites, tanto en condiciones de inicio de operación, como a largo plazo tras catorce eventos de lluvia consecutivos. Además, se demostró que el sistema de filtrado es capaz de albergar colonias de microorganismos degradadores de hidrocarburos.



## AGRADECIMIENTOS

La realización de esta tesis ha sido posible gracias al proyecto de investigación *Desarrollo de Nuevos Sistemas de Captación, Pretratamiento y Tratamiento In Situ, de Aguas Contaminadas con Hidrocarburos Procedentes de la Escorrentía Urbana en Aparcamientos con Firmes Impermeables (TRAPI)*, con referencia (CTM2006 00310/TECNO), financiado por el Ministerio de Educación y Ciencia con fondos del PGE (Presupuesto General del Estado) y del FEDER (Fondo Europeo de Desarrollo Regional).

Gracias al Grupo de Investigación de Tecnología de la Construcción (GITECO) de la Universidad de Cantabria, por gestionar este proyecto de investigación.

Gracias al Laboratorio de Caminos de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de Santander, por el espacio y apoyo.

Gracias al Laboratorio de Geosintéticos de la Universidad de Cantabria (LAGUC), por su colaboración al desarrollo de esta tesis.

Thanks to Hanson Formpave, Propex Fabrics and Tencate Polifelt for their permission to publish in this document the information of their products.



## ÍNDICE DE CONTENIDOS.

<b>1 INTRODUCCIÓN.</b>	<b>1</b>
1.1 Contexto de la tesis.	1
1.2 Hipótesis y objetivos.	2
1.3 Estructura de la tesis.	3
<b>2 ESTADO DEL ARTE.</b>	<b>5</b>
2.1 Contaminantes presentes en la escorrentía superficial.	5
2.2 Medición y caracterización de la carga contaminante de la escorrentía.	7
2.2.1 Estimación de la carga contaminante.	7
2.2.2 Comparación de las medidas de contaminación en varios continentes.	10
2.3 Fundamentos del sistema de alcantarillado.	21
2.4 Introducción al concepto de Drenaje Sostenible.	23
2.5 Clasificación propuesta de los diferentes sistemas de drenaje sostenible	24
2.5.1 Sistemas integrados en el paisaje.	24
2.5.2 Sistemas integrados en el drenaje convencional.	32
<b>3 METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN.</b>	<b>37</b>
3.1 Diseño y construcción del prototipo de un nuevo sistema de drenaje sostenible: SCPT.	37
3.1.1 Diseño del SCPT.	37
3.1.2 Elementos principales del SCPT.	41
3.1.3 Elementos complementarios del SCPT.	48
3.2 Fundamentos de los ensayos de laboratorio.	49
3.2.1 Contaminantes utilizados en los ensayos.	49
3.2.2 Procedimientos de análisis de calidad de aguas.	51
3.2.3 Determinación de las variables respuesta.	57
3.2.4 Procedimiento de análisis de presencia de microorganismos.	58

3.3	Ensayo 0: Conductividad hidráulica de los geotextiles.	63
3.4	Ensayo 1: Determinación de la eficiencia de depuración de partida del SCPT.	65
3.5	Ensayo 2: Determinación de la eficiencia de depuración a largo plazo del SCPT con carga alta de contaminantes.	67
3.6	Ensayo 3: Determinación de la eficiencia de depuración a largo plazo del SCPT con carga media de contaminantes.	70
3.7	Ensayo 4: Evaluación de la actividad microbiana en el SCPT.	70
<b>4</b>	<b>ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS.</b>	<b>73</b>
4.1	Resultados del Ensayo 0.	73
4.1.1	Análisis descriptivo e inferencial de la conductividad hidráulica de los geotextiles.	73
4.1.2	Discusión de los resultados de la conductividad hidráulica de los geotextiles.	76
4.2	Resultados del Ensayo 1.	77
4.2.1	Análisis descriptivo de los resultados del Ensayo 1.	77
4.2.2	Consideraciones generales sobre el análisis inferencial de los resultados del Ensayo 1.	80
4.2.3	Análisis de regresión para la concentración de sólidos en el efluente ( $EMC_S$ ) del Ensayo 1.	81
4.2.4	Análisis de regresión para la concentración de aceites en el efluente ( $EMC_A$ ) del Ensayo 1.	87
4.2.5	Análisis de regresión para eficiencia de depuración de sólidos ( $Ef_S$ ) del Ensayo 1.	88
4.2.6	Análisis de regresión para la eficiencia de depuración de aceites ( $Ef_A$ ) del Ensayo 1.	93
4.2.7	Resumen de la discusión de los análisis de los resultados del Ensayo 1.	99
4.3	Resultados Ensayo 2.	101
4.3.1	Análisis descriptivo de los resultados de calidad de aguas del Ensayo 2 .	102
4.3.2	Análisis de ajuste de curva con los resultados de calidad de aguas del Ensayo 2.	105

4.3.3	Análisis del desnivel de agua en el SCPT en Ensayo 2.	108
4.4	Resultados Ensayo 3	114
4.4.1	Análisis descriptivo de los resultados de calidad de aguas del Ensayo 3.	114
4.4.2	Análisis de ajuste de curva de los resultados de calidad de aguas del Ensayo 3.	116
4.4.3	Análisis del desnivel de agua en el SCPT en Ensayo 3.	122
4.5	Análisis comparativo de los resultados del Ensayo 2 y del Ensayo 3.	128
4.5.1	Comparación de eficiencias de retención de sólidos.	128
4.5.2	Comparación de eficiencias de retención de aceites.	129
4.5.3	Comparación de desnivel de agua en el Ensayo 2 y Ensayo 3.	133
4.6	Resultados del Ensayo 4.	136
<b>5</b>	<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.</b>	<b>141</b>
5.1	Conclusiones generales.	141
5.2	Conclusiones particulares.	143
5.3	Recomendaciones.	145
5.4	Futuras líneas de investigación.	146
<b>6</b>	<b>REFERENCIAS.</b>	<b>149</b>
<b>ANEXO I</b>	<b>TIPOS DE CURVAS UTILIZADAS EN LAS ESTIMACIONES CURVILÍNEAS</b>	<b>157</b>
<b>ANEXO II</b>	<b>CARACTERÍSTICAS DE LOS GEOTEXILES UTILIZADOS EN LA INVESTIGACIÓN</b>	<b>161</b>
<b>ANEXO III</b>	<b>RESULTADOS DEL ANÁLISIS ESTADÍSTICO CON SPSS DEL ENSAYO 0</b>	<b>167</b>
<b>ANEXO IV</b>	<b>RESULTADOS DEL ANÁLISIS ESTADÍSTICO CON SPSS DEL ENSAYO 1</b>	<b>179</b>

<b>ANEXO V</b>	<b>RESULTADOS DEL ANÁLISIS ESTADÍSTICO CON SPSS DEL ENSAYO 2</b>	<b>201</b>
<b>ANEXO VI</b>	<b>RESULTADOS DEL ANÁLISIS ESTADÍSTICO CON SPSS DEL ENSAYO 3</b>	<b>229</b>
<b>ANEXO VII</b>	<b>RESULTADOS DEL ANÁLISIS ESTADÍSTICO CON SPSS DEL ENSAYO 4</b>	<b>271</b>
<b>ANEXO VIII</b>	<b>RESULTADOS DEL ANÁLISIS COMPARATIVO CON SPSS DEL ENSAYOS 2 Y 3</b>	<b>277</b>
<b>ANEXO IX</b>	<b>FOTOGRAFÍAS DEL SCPT</b>	<b>291</b>

## ÍNDICE DE TABLAS.

Tabla 2.1.	Fuentes de contaminantes antropogénicos en la escorrentía superficial.	5
Tabla 2.2.	Contaminantes sobre los que se recopiló información y cantidad de datos obtenidos para cada uno de ellos.	12
Tabla 2.3.	Resumen de la clasificación de los sistemas de drenaje sostenible de aguas pluviales.	35
Tabla 3.1.	Características del aceite usado de motor de automóvil.	51
Tabla 3.2.	Factores considerados en el Ensayo 1 del SCPT y sus rangos de variación	66
Tabla 4.1.	Características de los geotextiles empleados en el Ensayo 0	73
Tabla 4.2.	Resultados del Ensayo 0 para diferentes geotextiles.	75
Tabla 4.3.	Subconjuntos homogéneos y valores de medias del caudal según tipo de geotextil en el Ensayo 0.	75
Tabla 4.4.	Configuración del SCPT, concentraciones en el efluente y eficiencia de depuración obtenidos en el Ensayo 1.	77
Tabla 4.5.	Resultados prueba de Shapiro-Wilk para variables las de respuesta en el Ensayo 1.	80
Tabla 4.6.	Resumen del análisis MRS de la EMC <sub>S</sub> en el Ensayo 1	82
Tabla 4.7.	Valores de los coeficientes de regresión, los coeficientes estandarizados, los intervalos de confianza del 95 % y la significancia de los coeficientes para el modelo adoptado para EMC <sub>S</sub> en el Ensayo 1.	85
Tabla 4.8.	Resumen del análisis MRS para EMC <sub>A</sub> en el Ensayo 1.	87
Tabla 4.9.	Resumen del análisis MRS para Ef <sub>S</sub> en el Ensayo 1.	88
Tabla 4.10.	Valores de los coeficientes de regresión, tipificados, intervalos de confianza del 95% y significancia de los coeficientes para el modelo adoptado para Ef <sub>S</sub> en el Ensayo 1	90
Tabla 4.11.	Resumen del análisis MRS para Ef <sub>A</sub> en el Ensayo 1.	94
Tabla 4.12.	Valores de los coeficientes de regresión, estandarizados, intervalos de confianza del 95 % y significancia de los coeficientes para el modelo adoptado para Ef <sub>A</sub> en el Ensayo 1.	95

Tabla 4.13.	Resultados de la etapa EI del Ensayo 2 del SCPT.	102
Tabla 4.14.	Resultados de carga contaminante en el efluente y eficiencia de depuración del SCPT para la etapa EII del Ensayo 2.	104
Tabla 4.15.	Tipo de curva de ajuste y p-valor para la significancia del ajuste para la calidad de agua en el Ensayo 2.	105
Tabla 4.16.	Valores de desnivel de agua entre las zonas de tapón hidráulico y de sobre el sistema de filtrado del SCPT de la etapa EI correspondiente al Ensayo 2.	108
Tabla 4.17.	Posibles curvas de ajuste a los valores de altura mididos en la etapa EI correspondiente al Ensayo 2.	109
Tabla 4.18.	Valores de desnivel de agua entre las zonas de tapón hidráulico y en la zona sobre el sistema de filtrado del SCPT, en la etapa EII correspondiente al Ensayo 2.	111
Tabla 4.19.	Posibles curvas de ajuste a los valores de desnivel de agua en la etapa EII correspondiente al Ensayo 2.	112
Tabla 4.20.	Resultados de la etapa EIII correspondiente al Ensayo 3.	114
Tabla 4.21.	Resultados de carga contaminante en el efluente y eficiencia de depuración del SCPT para nuevo geotextil en etapa EIV correspondiente al Ensayo 3.	116
Tabla 4.22.	Tipos de curva de ajuste y sus valores característicos para la etapa de EIII correspondiente al Ensayo 3.	118
Tabla 4.23.	Valores de desnivel entre la zona de tapón hidráulico y la zona sobre el sistema de filtrado para la etapa EIV correspondiente al Ensayo 3.	123
Tabla 4.24.	Posibles curvas de ajuste a los valores de desnivel de agua de la etapa EIII correspondiente al Ensayo 3.	124
Tabla 4.25.	Posibles curvas de ajuste a los valores de desnivel de agua en la etapa EIV correspondiente al Ensayo 3.	125
Tabla 4.26.	Estadísticos descriptivos de la eficiencia de depuración de sólidos en condiciones de carga alta y carga media.	128
Tabla 4.27.	Estadísticos descriptivos de la eficiencia de depuración de aceite en condiciones de carga alta, carga media y globales.	130
Tabla 4.28.	Posibles curvas de ajuste a los valores de eficiencia de depuración de aceites.	130

---

Tabla 4.29.	Valores de eficiencia de depuración de aceites en carga alta y carga media en zona de tapón hidráulico y zona sobre sistema de filtrado.	132
Tabla 4.30.	Posibles curvas de ajuste a los valores de desnivel en condiciones de carga alta y carga media.	134
Tabla 4.31.	Valores de MPN por semana medios en el Ensayo 4.	137
Tabla 5.1.	Principales modelos del funcionamiento del SCPT obtenidos a partir de la investigación realizada.	144



## ÍNDICE DE GRÁFICOS.

Gráfico 2.1.	Log <sub>10</sub> EMC de TSS según continente y características de la cuenca analizadas.	14
Gráfico 2.2.	EMC de O&G según continente y características de la cuenca analizadas.	15
Gráfico 2.3.	Log <sub>10</sub> EMC de Zn según continente y características de la cuenca analizada.	16
Gráfico 2.4.	Log <sub>10</sub> de EMC de Cu según las características de la cuenca analizadas.	17
Gráfico 2.5.	EMC de DQO según continente y características de la cuenca analizada.	19
Gráfico 3.1.	Frecuencias de radiación infrarroja absorbidas por el aceite (a) y el disolvente S-316 (b)	55
Gráfico 4.1.	Gráficos de relación de los residuos del modelo adoptado para la EMC <sub>S</sub> frente a los valores ajustados (a) y los valores de las variables predictoras (b, c, d).	83
Gráfico 4.2.	Resultados obtenidos en el Ensayo 1 en función de las variables predictoras determinadas para EMC <sub>S</sub> .	86
Gráfico 4.3	Gráficos de relación de los residuos del modelo adoptado para la EMC <sub>A</sub> contra los valores ajustados (a) y los valores de las variables predictoras (b, c) correspondiente al Ensayo 1.	88
Gráfico 4.4.	Gráficos de relación de los residuos del modelo adoptado para la Ef <sub>S</sub> contra los valores ajustados (a) y los valores de las variables predictoras (b, c) correspondiente al Ensayo 1.	89
Gráfico 4.5.	Resultados obtenidos en la primera etapa de experimentación en función de las variables predictoras determinadas para Ef <sub>S</sub> .	92
Gráfico 4.6.	Ábaco del comportamiento de la eficiencia de depuración de sólidos en el SCPT.	93
Gráfico 4.7.	Gráficos de relación de los residuos del modelo adoptado para la Ef <sub>O&amp;G</sub> contra los valores ajustados (a) y los valores de las variables predictoras (b, c, d) correspondientes al Ensayo 1.	95

Gráfico 4.8.	Resultados obtenidos en el Ensayo 1 en función de las variables predictoras determinadas para $Ef_A$ .	98
Gráfico 4.9.	Ábaco del comportamiento de la eficiencia de depuración de aceite del SCPT.	99
Gráfico 4.10.	Concentraciones de aceite ( $EMC_A$ ) y su eficiencia de depuración ( $Ef_A$ ) según el número de eventos simulados realizados en la etapa EI correspondiente al Ensayo 2.	103
Gráfico 4.11.	Concentraciones de sedimentos ( $EMC_S$ ) y su eficiencia de depuración ( $Ef_S$ ) según el número de eventos simulados realizados en la etapa EI correspondiente al Ensayo 2.	103
Gráfico 4.12.	Curvas ajustadas de (a) $EMC_S$ y (b) $Ef_S$ para la etapa EI correspondiente al Ensayo 2.	107
Gráfico 4.13.	Valores del desnivel de agua y la recta ajustada para la etapa EI correspondiente al Ensayo 2.	110
Gráfico 4.14.	Valores del desnivel de agua y de la curva exponencial ajustada, en la etapa EII correspondiente al Ensayo 2.	113
Gráfico 4.15.	Razón de cambio de la Ecuación 4.8 y la Ecuación 4.9, correspondientes al Ensayo 2.	113
Gráfico 4.16.	Tendencia de (a) $EMC_A$ y (b) $Ef_A$ para la etapa EIII correspondiente al Ensayo 3.	117
Gráfico 4.17.	Tendencia de (a) $EMC_S$ y (b) $Ef_S$ para la etapa EIII correspondiente al Ensayo 3.	120
Gráfico 4.18.	Valores de desnivel entre la zona de tapón hidráulico y la zona sobre el sistema de filtrado en la etapa EIII correspondiente al Ensayo 3.	122
Gráfico 4.19.	Valores de desnivel y curva cúbica ajustada para etapa EIII correspondiente al Ensayo 3.	125
Gráfico 4.20.	Valores de desnivel y curva cuadrática ajustada etapa EIV.	127
Gráfico 4.21.	Razón de cambio de la Ecuación 4.14 y Ecuación 4.15	127
Gráfico 4.22.	Valores y curvas ajustadas de la eficiencia de depuración de sólidos en condiciones de cara alta y carga media.	129
Gráfico 4.23.	Valores y curva ajustada de la eficiencia de depuración de aceite en condiciones de cara alta y carga media en	

---

zona de tapón hidráulico y zona sobre el sistema de filtrado.	133
Gráfico 4.24. Valores del desnivel y la curva ajustada.	135
Gráfico 4.25. Relación de los residuos tipificados del modelo lineal frente a los valores pronosticados tipificados.	138
Gráfico 4.26. Densidad de población media de microorganismos por semana.	139



## ÍNDICE DE FIGURAS.

Figura 2.1.	Algunas tipologías de superficies permeables: (a) pavimento de bloques, (b) césped reforzado, (c) asfalto poroso y (d) hormigón poroso (Perales Momparler y Andrés-Doménech 2008).	26
Figura 2.2.	Cubiertas vegetadas (Perales Momparler y Andrés-Doménech 2008).	26
Figura 2.3.	Franja filtrante (Perales Momparler y Andrés-Doménech 2008).	27
Figura 2.4.	Depósitos de infiltración (Perales Momparler y Andrés-Doménech 2008).	28
Figura 2.5.	Cuneta verde (Perales Momparler y Andrés-Doménech 2008).	29
Figura 2.6.	Depósito de detención superficial (Perales Momparler y Andrés-Doménech 2008).	30
Figura 2.7.	Estanque de retención (Perales Momparler y Andrés-Doménech 2008).	31
Figura 2.8.	Humedales artificiales (Perales Momparler y Andrés-Doménech 2008).	31
Figura 2.9.	Cesta de desbaste (Suntree Technologies 2009).	32
Figura 2.10.	Trampa de sedimentos (Bulbeck Envirosolutions 2009).	33
Figura 2.11.	Separador hidrodinámico (Hydro International 2009).	33
Figura 2.12.	Separador de aceites y sedimentos (Permavoid Limited 2006).	34
Figura 3.1.	Velocidades estimadas dentro del Sistema de Captación, Pretratamiento y Tratamiento (SCPT) mediante Ansys CFX 10.0.	40
Figura 3.2.	Estructura de metacrilato del prototipo del SCPT.	41
Figura 3.3.	Configuración del prototipo del SCPT.	42
Figura 3.4.	Pantalla, tapón hidráulico y volumen de decantación del SCPT.	43
Figura 3.5.	Soporte del sistema de filtrado del SCPT.	45
Figura 3.6.	Sistema de filtrado tipo A del SCPT (a), compuesto por capas de geotextil (b) y una capa de árido (c).	46
Figura 3.7.	Sistema de filtrado tipo B del SCPT.	47

Figura 3.8.	Sistema de filtrado tipo C del SCPT.	47
Figura 3.9.	Rampa de aducción (a) y sistema de recirculación de agua (b).	48
Figura 3.10.	Granulometría de los sedimentos utilizados en los ensayos con el SCPT de laboratorio (Zafra Mejía y Temprano González 2005).	50
Figura 3.11.	Imágenes de los materiales empleados en los análisis de sólido suspendidos.	53
Figura 3.12.	Materiales complementarios empleados en el análisis de muestras de agua contaminada con aceites.	56
Figura 3.13.	Analizador de contenido de aceite en agua HORIBA OCMA 310.	57
Figura 3.14.	Tubos con tapa rosca (a) y Vortex (b) utilizados para la extracción de bacterias de las muestras de raspado de los geotextiles.	59
Figura 3.15.	Mezcla de muestra de bacterias disuelta en agua destilada.	60
Figura 3.16.	Microtiter (a) y micropipetas (b) utilizados en el aislamiento de bacterias degradadoras de hidrocarburos.	61
Figura 3.17.	Determinación de réplicas positivas del método del número más probable (Most Probable Number, MNP).	62
Figura 3.18.	Probetas de geotextil a emplear en el Ensayo 0.	63
Figura 3.19.	Equipo de análisis de flujo perpendicular a las fibras de geotextil (LAGUC) empleado en el Ensayo 0.	64
Figura 3.20.	Colocación de la probeta en la máquina de ensayos.	65
Figura 3.21.	Pasos del Ensayo 1: Vertido de sólidos (a) y aceites (b), circulación de agua (c) y comportamiento del SCPT (d).	67
Figura 3.22.	Configuración de SCPT adoptada para la etapa de largo plazo (Ensayos 2 y 3).	68
Figura 3.23.	Nivel remanente de agua que evita la pérdida de aceites del interior del SCPT entre eventos del Ensayo 2.	69
Figura 3.24.	División del área de estudio y zonas de extracción de muestras.	71
Figura 3.25.	División de las zonas de extracción de muestra y orden de extracción de muestras.	72

---

Figura 4.1.	Retención de aceite en las paredes internas del SCPT en condiciones (a) de baja concentración de aceites y (b) de alta concentración de aceites.	97
Figura 4.2.	Desplazamiento del sistema de filtrado producto de la fuerza de empuje ejercida por el agua.	101
Figura 4.3.	Diferencia de nivel de agua entre las zonas del tapón hidráulico y la zona sobre el sistema de filtrado del SCPT.	108
Figura 4.4.	Ubicación de las zonas de extracción de muestras complementarias de agua durante los Ensayos 2 y 3.	131



## ÍNDICE DE ECUACIONES.

Ecuación 2.1	7
Ecuación 2.2	8
Ecuación 2.3	9
Ecuación 2.4	9
Ecuación 2.5	9
Ecuación 3.1	37
Ecuación 3.2	38
Ecuación 3.3	38
Ecuación 3.4	39
Ecuación 3.5	39
Ecuación 3.6	53
Ecuación 3.7	58
Ecuación 3.8	58
Ecuación 3.9	62
Ecuación 4.1	81
Ecuación 4.2	84
Ecuación 4.3	90
Ecuación 4.4	92
Ecuación 4.5	94
Ecuación 4.6	106
Ecuación 4.7	106
Ecuación 4.8	110
Ecuación 4.9	112
Ecuación 4.10	116
Ecuación 4.11	116
Ecuación 4.12	119
Ecuación 4.13	119
Ecuación 4.14	124
Ecuación 4.15	126
Ecuación 4.16	130
Ecuación 4.17	132
Ecuación 4.18	134
Ecuación 4.19	137
Ecuación 4.20	138

Ecuación 4.21

139

## 1 INTRODUCCIÓN.

### 1.1 Contexto de la tesis.

Los eventos de precipitación y su consecuente escorrentía superficial generan problemas en las zonas urbanas. Estos problemas se deben principalmente a la insuficiencia de los sistemas de captación, transporte y evacuación para manejar adecuadamente las aguas de escorrentía de eventos extremos y a la capacidad de la escorrentía superficial de arrastrar contaminantes presentes en las superficies por donde transita hacia los cuerpos de agua naturales y artificiales, efecto que es conocido como contaminación difusa (Castro Fresno et al. 2005).

Los tipos y las cantidades de los diferentes contaminantes que pueden estar presentes en la escorrentía superficial dependen de una serie de factores, entre los que se pueden contar el tamaño de la cuenca, el uso del suelo, la intensidad de la precipitación, la duración de la precipitación, la duración del período seco entre eventos de lluvia, la densidad del tráfico, el período estacional y la orientación del viento (Crabtree et al. 2006; Soller et al. 2005; Brown y Peake 2006; Göbel et al. 2006; Kayahanian et al. 2007). Dada esta cantidad de factores la forma de hacer frente la carga contaminante varía de un caso a otro.

Como los contaminantes y su concentración son variables entre distintos lugares, la presente investigación está acotada al caso particular de los firmes impermeables utilizados en las zonas de aparcamiento.

Los principales contaminantes que se pueden encontrar en las zonas de aparcamiento son derrames de aceite, gasolinas, fluidos hidráulicos o refrigerantes, partículas procedentes de la combustión incompleta de los carburantes, desgaste de frenos y embrague, así como sólidos de diferente tamaño que son transportados por acción eólica o por los vehículos (Brown y Peake 2006; Göbel et al. 2006; Huang et al. 2006; Mahler et al. 2005; Boving y Neary 2006a).

La incidencia de la contaminación difusa de la escorrentía en el medio natural ha motivado la promulgación de normativas que limiten los valores de los contaminantes presentes en los efluentes vertidos a los cuerpos receptores, tanto en países de Europa como en otros países del mundo. En forma paralela y complementaria a la promulgación de normativas, se han llevado a cabo diversos estudios de los valores de carga contaminante de la escorrentía superficial. Ambas condiciones han llevado al desarrollo de numerosos sistemas de depuración de las aguas de escorrentía superficial con el objetivo de reducir las cargas contaminantes que arrastra a niveles aceptables por la normativa.

El Grupo de Investigación de Tecnología de la Construcción (GITECO) de la Universidad de Cantabria, ha estado desarrollando diversas investigaciones sobre sistemas de depuración de aguas de escorrentía. En esta línea se encuentra el Proyecto de Investigación Científica y Desarrollo Tecnológico del Ministerio de Educación y Ciencia CTM2006 00310/TECNO, titulado: *"Desarrollo de Nuevos Sistemas de Captación, Pretratamiento y Tratamiento In Situ, de Aguas Contaminadas con Hidrocarburos Procedentes de la Escorrentía Urbana en Aparcamientos con Firmes Impermeables (TRAPI)"*. La presente tesis doctoral está fundamentada en el desarrollo de dicho proyecto.

## 1.2 Hipótesis y objetivos.

Las hipótesis que se plantean para el desarrollo de la investigación son:

- Es posible diseñar un sistema de captación, pretratamiento y tratamiento de escorrentía superficial funcional para su aplicación en aparcamientos.
- El sistema es capaz de albergar una colonia de microorganismos que degrade los hidrocarburos retenidos, permitiendo el automantenimiento del mismo.

El objetivo general que se pretende alcanzar con esta tesis es:

- Diseñar y probar un sistema de captación, pretratamiento y tratamiento in situ de las aguas de escorrentía superficiales proveniente de aparcamientos con firmes impermeables.

Los objetivos particulares que se desprenden del objetivo general son:

- Establecer las características físicas del sistema a diseñar y construir un prototipo de laboratorio del mismo.
- Determinar los niveles de depuración de los contaminantes del sistema prototipo en laboratorio.
- Determinar el comportamiento a largo plazo de los niveles de depuración de los contaminantes del sistema prototipo.
- Comprobar la presencia de comunidades microbianas degradadoras de hidrocarburos en el sistema prototipo.
- Analizar el crecimiento de las comunidades microbianas degradadoras de hidrocarburos a largo plazo.

### 1.3 Estructura de la tesis.

Esta tesis está estructurada en 5 capítulos. En estos capítulos se exponen las hipótesis y objetivos, un breve estado del arte, las metodologías empleadas, los análisis realizados a los datos obtenidos de los ensayos, las conclusiones y las propuestas de futuras líneas de investigación. A continuación se hace una breve descripción de cada uno de los capítulos.

Capítulo 1: contiene una introducción a la tesis, donde se explica el contexto en el que se desarrolla el proyecto de investigación. También se presentan las hipótesis de trabajo y los objetivos perseguidos con la investigación que da origen a esta tesis doctoral.

Capítulo 2: corresponde a la revisión del estado del arte. Contiene un repaso de la problemática originada por la contaminación de las aguas de escorrentía superficial, producto de su capacidad de arrastre de los elementos presentes en la superficie de los pavimentos, especialmente cuando son impermeables. Además se analiza la influencia de algunos factores presentes en las cuencas sobre la carga contaminante de las aguas de escorrentía superficial. Por último, se hace una clasificación de los distintos métodos de drenaje sostenible que se utilizan de forma habitual para tratar las aguas de escorrentía en origen.

Capítulo 3: contiene la descripción del prototipo de laboratorio del sistema de captación, pretratamiento y tratamiento propuesto, tanto de sus partes principales como de los elementos complementarios necesarios para la operación del mismo. A continuación, se presentan las metodologías de los ensayos realizados, así como los análisis de las muestras tomadas. Estas descripciones indican cuales son los materiales empleados en cada uno de los análisis y los procedimientos seguidos.

Capítulo 4: presenta los análisis realizados con la información obtenida de los ensayos y la discusión de los resultados. Los análisis realizados son de tipo descriptivo e inferencial, y en algunos casos comparativos entre los distintos ensayos.

Capítulo 5: capítulo final en el que se presentan las principales conclusiones obtenidas de las discusiones realizadas en el capítulo 4. Además, se presentan algunas recomendaciones y las futuras líneas de investigación que surgen a partir de la investigación realizada en esta tesis.

Se cierra el documento con la enumeración de las referencias utilizadas y los anexos que recogen con mayor detalle los principales análisis llevados a cabo en de la investigación.

## 2 ESTADO DEL ARTE.

### 2.1 Contaminantes presentes en la escorrentía superficial.

El fenómeno de la contaminación de las aguas de lluvia producto del lavado de las superficies por las que escurre, denominado contaminación difusa, se viene estudiando desde hace unos 30 años (Göbel et al. 2006; Characklis y Wiesner 1997; Charbeneau y Barrett 1998; Marsalek 1991). En este tiempo, investigaciones realizadas han demostrado que los contaminantes presentes en la escorrentía superficial tienen un origen principalmente antrópico y que pueden afectar negativamente al medio ambiente y a las personas (Boving y Neary 2006a).

Los contaminantes que pueden estar presentes en la escorrentía superficial son aceite de motor, carburantes (gasolina, diesel), sólidos en suspensión, metales pesados (Cu, Zn, Pb, Fe), nutrientes (P, N) y iones de Na, K, Mg, Ca, Cl y SO<sub>4</sub>, entre otros (Mahler et al. 2005; Characklis y Wiesner 1997; Booth 2003; Vaze y Chiew 2004; Wu et al. 1998). Sansalone y Buchberger (1997a; 1997b) hacen un cuadro resumen (Tabla 2.1) que permite visualizar la relación entre algunos contaminantes y su posible origen, donde se observa que los contaminantes no tienen una única fuente de generación.

Tabla 2.1. Fuentes de contaminantes antropogénicos en la escorrentía superficial (Sansalone y Buchberger 1997b).

	Frenos	Neumáticos	Carrocería	Combustibles y aceites	Pavimento de hormigón	Pavimento de asfalto	Agentes descongelantes	Limo
Cadmio								
Cromo								
Cobre								
Hierro								
Níquel								
Plomo								
Vanadio								
Zinc								
Clorhidratos								
Sólidos Orgánicos								
Sólidos Inorgánicos								
PAHs								
Fenoles								

■ Fuente primaria

■ Fuente secundaria

Diversos estudios han tratado de encontrar relaciones entre las variaciones en la concentración de diferentes contaminantes y los factores presentes en la cuenca. Entre estos se pueden contar: el tamaño de la cuenca, el uso del suelo, la densidad del tráfico, la orientación del viento, y factores dependientes de la precipitación como la intensidad, duración, magnitud (volumen de agua precipitada) y duración del período seco entre dos eventos consecutivos.

Comparando las conclusiones de los estudios realizados sobre la forma en cómo influyen los distintos factores sobre la carga contaminante, se observan discrepancias sobre esta influencia en algunos de ellos. Posiblemente el caso más representativo de esta situación esté dado por el intensidad media diaria (IMD) de vehículos que pasan por la zona estudiada. Hallberg et al. (2007) e Irish et al. (1998) señalan que el IMD tiene una relación importante con la carga contaminante y que sería de tipo directa; sin embargo, Crabtree et al. (2006) no encuentran una relación entre este factor y la carga contaminante, y, Hewitt y Rashed (1992) señalan que la relación existe pero que es de tipo inversa.

Estas discrepancias pueden deberse a que la mayoría de los estudios se han realizado sobre un pequeño número de cuencas, lo que dificulta determinar el grado de influencia de los factores presentes en ellas.

Una forma utilizada para dar mayor validez a los resultados obtenidos en una cuenca ha sido compararlos con los de otros estudios en otras cuencas (Wu et al. 1998; Tuccillo 2006; Lau et al. 2002; Lee et al. 2005; Marsalek et al. 1997; Zhang et al. 2008; Prestes et al. 2006). Sin embargo, solamente Mitchell (2005) ha realizado un análisis estadístico que avale este tipo de comparación para la influencia del uso de suelo entre estudios realizados en Europa. Incluso Kayahanian et al. (2007) y Khan et al. (2006) recomiendan tener precaución al utilizar sus resultados en comparaciones con otras cuencas porque podrían no ser apropiadas según las condiciones. En el punto 2.2.2. se hace un análisis más detallado de estas cuestiones

## 2.2 Medición y caracterización de la carga contaminante de la escorrentía.

La concepción que se da actualmente a los sistemas de drenaje urbano tiene como uno de sus objetivos principales disminuir la carga contaminante presente en las aguas de escorrentía (ver punto 2.4). Ante esto surge el problema de cómo medir la carga contaminante y cuantificar la efectividad de los distintos métodos y sistemas desarrollados.

En este apartado se expone una de las metodologías más extendida en la estimación de la carga contaminante. Además, se hace un análisis de las cargas contaminantes de las aguas de escorrentía urbana obtenidas por ese método y recopiladas en la revisión bibliográfica.

### 2.2.1 Estimación de la carga contaminante.

La forma más simple y común de estimar la carga contaminante en la escorrentía superficial es por medio de la concentración media del evento (Event Mean Concentration, EMC) (Taebi y Droste 2004).

La EMC de un evento en una cuenca específica corresponde al resultado de dividir la masa total del contaminante arrastrado por el volumen total de escorrentía (Ecuación 2.1).

$$EMC = \frac{\sum_{i=1}^N \Delta M_i}{\sum_{i=1}^N \Delta \forall_i} = \frac{\sum_{i=1}^N C_i Q_i \Delta t_i}{\sum_{i=1}^N Q_i \Delta t_i} \quad \text{Ecuación 2.1}$$

Donde

N : Número de muestras.

$\Delta M_i$  : Masa de contaminante en la escorrentía superficial.

$\Delta \forall_i$  : Volumen de escorrentía superficial para el intervalo de tiempo  $\Delta t_i$ .

- $C_i$  : Concentración promedio de la escorrentía superficial para el intervalo de tiempo  $\Delta t_i$ .
- $Q_i$  : Caudal promedio de escorrentía superficial para el intervalo de tiempo  $\Delta t_i$ .
- $\Delta t$  : Intervalo discreto de tiempo.

La EMC es muy apropiada para evaluar los efectos de la contaminación arrastrada por la escorrentía superficial hacia los cuerpos de agua receptores. Estos cuerpos receptores responden de forma lenta a los contaminantes aportados por las aguas pluviales, en comparación con el cambio de razón de la concentración de los contaminantes en la escorrentía superficial (Charbeneau y Barrett 1998).

Sin embargo, la EMC no es apropiada si se quiere evaluar la variación de la carga contaminante durante un evento de precipitación, por lo que algunos investigadores han desarrollado distintas metodologías para estimar esa variación. Lee y Bang (2000) plantean que la relación entre la escorrentía superficial y la carga contaminante durante un evento se puede expresar en términos de la Ecuación 2.2.

$$\frac{L}{A} = \alpha \left( \frac{Q}{A} \right)^\beta$$

**Ecuación 2.2**

Donde

- $L$  : Carga contaminante de la escorrentía superficial (kg/ha).
- $A$  : Área de la cuenca aportante (ha).
- $Q$  : Caudal de escorrentía superficial (m<sup>3</sup>/h).
- $\alpha$  : Coeficiente de regresión que representa la carga de contaminante base.
- $\beta$  : Coeficiente de regresión que representa la respuesta de la escorrentía superficial al evento de precipitación.

En su estudio, Lee y Bang (2000) determinan que la magnitud de la razón de carga de contaminante (Ecuación 2.2) varía según el orden siguiente: cuencas con alta densidad residencial > cuencas con baja densidad residencial > cuencas industriales > cuencas sin desarrollo urbano.

Otra forma de observar la variación de la carga contaminante durante el evento de precipitación es la concentración media parcial del evento (Partial Event Mean Concentration, PEMC). La PEMC está basada en la EMC y consiste en determinar la carga media de contaminante para un tiempo menor al total del evento de precipitación. La PEMC está definida según la Ecuación 2.3 (Lee et al. 2002).

$$PEMC = \frac{m(t)}{v(t)} = \frac{\int_0^t C_i Q_i dt}{\int_0^t Q_i dt} = \frac{\sum C_i Q_i \Delta t}{\sum C_i \Delta t} \quad \text{Ecuación 2.3}$$

Donde

- $m(t)$  : Masa de contaminante transportada hasta el tiempo  $t$ .
- $v(t)$  : Volumen de escorrentía directa hasta el tiempo  $t$ .
- $C_t$  : Concentración promedio de la escorrentía superficial hasta el tiempo  $t$ .
- $Q_i$  : Caudal promedio de escorrentía superficial hasta el tiempo  $t$ .
- $\Delta t$  : Intervalo discreto de tiempo.

Si se divide  $m(t)$  por el total de la masa contaminante ( $M$ ) se obtiene el parámetro de masa de contaminantes adimensional normalizado ( $L$ ) (Ecuación 2.4). De igual forma, si se divide  $v(t)$  por el volumen total de escorrentía ( $V$ ) se obtiene el volumen de escorrentía adimensional normalizado ( $F$ ) (Ecuación 2.5) (Lee et al. 2002).

$$L = \frac{m(t)}{M} \quad \text{Ecuación 2.4}$$

$$F = \frac{v(t)}{V} \quad \text{Ecuación 2.5}$$

Dividiendo  $L$  por  $F$  se puede determinar la evolución de la concentración de contaminantes a través del evento de precipitación. Si la razón es igual a 1 significa que la PEMC es igual a la EMC para ese periodo  $t$ . En cambio si es mayor que 1 entonces la PEMC es mayor que la EMC, e inversamente si la razón es menor que 1 la PEMC es menor que la EMC.

El caso en que la razón entre  $L$  y  $F$  sea mayor a 1 recibe el nombre de *first flush* o fenómeno de primer lavado, aunque esta no es la única definición de *first flush* (Lee et al. 2002). Esto señala que la concentración de contaminantes es significativamente mayor en los periodos iniciales del evento de tormenta (Barrett et al. 1998a). Por lo que sugiere que una fracción desproporcionadamente alta de contaminantes puede ser arrastrada durante los primeros momentos de la tormenta (Characklis y Wiesner 1997).

Pero como se dijo anteriormente, los cuerpos de agua por lo general no se ven afectados por esta mayor concentración en los momentos iniciales del evento de la tormenta, ya que el efecto total de la tormenta sobre ellos está más bien relacionado con la carga media de contaminante aportado durante dicho evento (Charbeneau y Barrett 1998).

### 2.2.2 Comparación de las medidas de contaminación en varios continentes.

Como se indicó en el punto 2.1, existe una diversidad de estudios que han determinado los valores de concentración de contaminantes en distintas cuencas urbanas. Sin embargo, los resultados de estos estudios son específicos para el lugar donde fueron realizados y no han sido analizados para determinar si son comparables entre ellos y si estos valores son extrapolables a lugares que tengan características similares.

Dada la situación anterior, como parte del estudio del estado del arte se procedió a realizar un análisis de los datos existentes en la bibliografía disponible sobre la carga contaminante de la escorrentía urbana.

El primer paso en este análisis consistió en la creación de una base de datos sobre la concentración de contaminantes presentes en la escorrentía superficial en diversas cuencas. Estos datos se extrajeron de artículos publicados y obtenidos mediante una amplia revisión de la información disponible en los principales motores de búsqueda de información científica y tecnológica. Agrupados por continente los artículos analizados son:

América: Thomson et al. (1997), Barrett et al. (1998a; 1998b), Charbeneau y Barrett (1998), Sansalone et al. (1998), Wu et al. (1998), Lau et al. (2002), Dean et al. (2005), Behera et al. (2006), Han et al. (2006), Heyvaert et al. (2006), Khan et al. (2006), Flint y Davis (2007), Fulkerson et al. (2007), Li et al. (2008).

Asia: Lee et al. (2005), Kim et al. (2007), Gan et al. (2008).

Europa: Stotz y Krauth (1994), Barbosa y Hvitved-Jacobsen (1999), Legret y Colandini (1999), Pettersson et al. (1999), Gnecco et al. (2005), Hallberg y Renman (2006), Hallberg et al. (2007).

Las condiciones para incluir los resultados de una cuenca dentro de la base de datos fueron:

- Muestras tomadas en un sistema separativo de conducción de aguas pluviales.
- Área de la cuenca menor a 200 ha.
- Determinación de la carga contaminante por medio de la concentración media del evento (Event Mean Concentration, EMC) (ver punto 2.2.1).
- Disponibilidad de información sobre alguna de las siguientes características de la cuenca:
  - ◆ Localización (continente en el que se encuentra).
  - ◆ Tamaño de la cuenca.
  - ◆ Tipo de uso del suelo.
  - ◆ Intensidad media diaria (IMD).

En los casos en que el estudio presentase datos de varios eventos de precipitación en una misma cuenca, la EMC adoptada en la base de datos correspondió al promedio de las EMC individuales para cada contaminante analizado.

De esta forma, la base de datos quedó conformada por 46 cuencas. Los contaminantes sobre los que se recopiló información y la cantidad de datos sobre cada uno de ellos se presenta en la Tabla 2.2.

Tabla 2.2. Contaminantes sobre los que se recopiló información y cantidad de datos obtenidos para cada uno de ellos.

Contaminante	Abreviatura	Número de cuencas con información	Porcentaje de cuencas con información
Sólidos Suspendidos	TSS	41	89%
Aceites y Grasas	O&G	14	30%
Zinc	Zn	25	54%
Cobre	Cu	25	54%
Demanda Química de Oxígeno	DQO	26	56%

Un primer análisis de los datos recopilados consistió en determinar la normalidad de las EMC de los distintos contaminantes por medio de la prueba de Shapiro-Wilk (Shapiro y Wilk 1965). Esta prueba determinó que los valores de contaminación debido a la Demanda Química de Oxígeno (DQO) y Aceites y Grasas (Oil y Grease, O&G) se ajustan a una distribución normal, mientras que en el caso de los valores de sólidos suspendidos (Total Suspended Solids, TSS), Zn y Cu no lo hacen ( $p$ -valor  $< 0.05$ ). Sin embargo, con una transformación mediante  $\text{Log}_{10}$  y aplicando la misma prueba, se consiguió la normalidad de las muestras, concordando con lo planteado por Mitchell (2005) para dichos contaminantes.

A continuación, los valores del tamaño de la cuenca y de la intensidad media diaria (IMD) fueron divididos en cuartiles, asignándole a cada cuartíl una etiqueta siguiendo el orden de categoría: Baja, Media, Alta o Muy Alta.

Además, los tipos de uso de suelo de la cuenca considerados fueron:

- Comercial.
- Residencial.
- Rural.
- Carretera.
- Urbano.

Cuando la descripción del uso del suelo del estudio de referencia no correspondía exactamente a uno de estos grupos, se clasificó en el que más se aproximaba según los antecedentes presentes en el artículo del que procedían los datos.

Una vez realizado este tratamiento previo se realizó un análisis estadístico a los datos de los distintos contaminantes agrupados por categorías.

- ***Sólidos suspendidos totales (TSS)***. Mediante el análisis ANOVA (Milton y Arnold 2003) se determinó que las EMC para los diferentes continentes no presentan variaciones estadísticamente significativas.

Así mismo, se realizaron comparaciones para identificar la posible influencia de las diferentes características de la cuenca. El resultado de estas comparaciones fue que el tamaño de la cuenca, el uso de suelo y la IMD no tienen relevancia estadística en la variación de la EMC de la cuenca, concordando con lo planteado por Crabtree et al. (2006). En el Gráfico 2.1 se observa, tal como se ha dicho, que para las distintas características de las cuencas la variación de la EMC de TSS es similar.

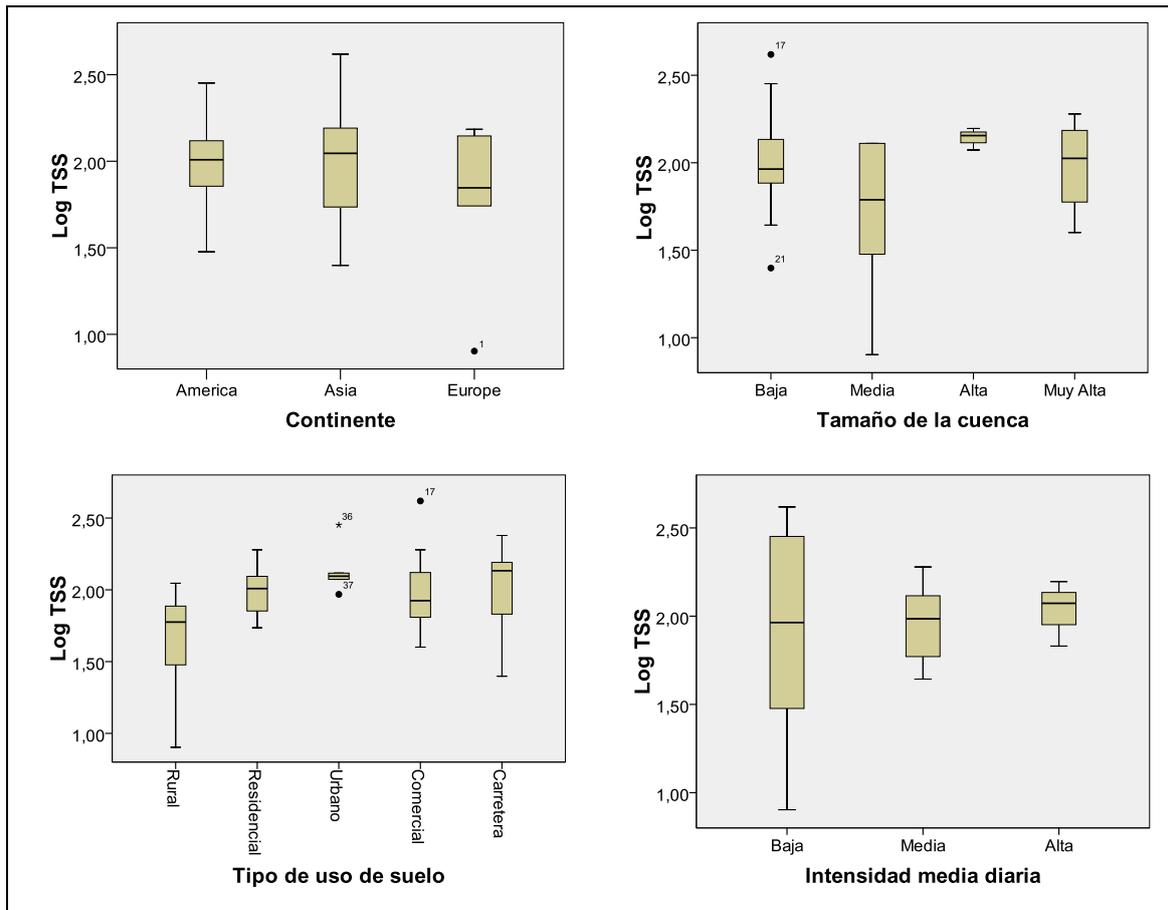


Gráfico 2.1. Log<sub>10</sub> EMC de TSS según continente y características de la cuenca analizadas.

- **Aceites y grasas (O&G).** En el caso de los O&G sólo fue posible incluir en la base de datos información de América y Asia. La mayor parte de la información sobre Europa correspondía a redes unitarias y en el caso de redes separativas no contenía datos sobre O&G.

Mediante el análisis de la Prueba T (Milton y Arnold 2003), se determinó que las EMC para América y Asia no presentan variaciones estadísticamente significativas.

A continuación, se analizó la influencia de las características de la cuenca sobre la EMC de los O&G. En el caso del tamaño de la cuenca y del uso de suelo se determinó que no tenían diferencias estadísticamente significativas en la variación de la EMC. Con respecto a la IMD, se determinó que sí existía una diferencia estadísticamente significativa para un 95 % de nivel de confianza.

Aplicando la comparación de Tukey (Box et al. 2005) a las diferentes categorías de IMD, se determinó que la categoría *Alta* se diferencia de las categorías *Baja* y *Media*, pero no es posible diferenciarla de la categoría *Muy Alta*.

La comparación entre las restantes categorías (*Baja*, *Media* y *Muy Alta*) no presentó diferencias según este análisis. Luego, es el tráfico de la categoría *Alta* el único que tiene características diferentes que hacen que el estadístico p-valor del análisis ANOVA (Milton y Arnold 2003) sea inferior a 0,05.

De esta forma, se constituyen dos grupos: *Baja-Media- Muy Alta* y *Alta-Muy Alta*. Este efecto no puede explicarse con la información recopilada. Por lo tanto, se deberá estudiar más la influencia de la IMD en la concentración de O&G con un mayor número de cuencas. Todos estos análisis pueden apreciarse en el Gráfico 2.2.

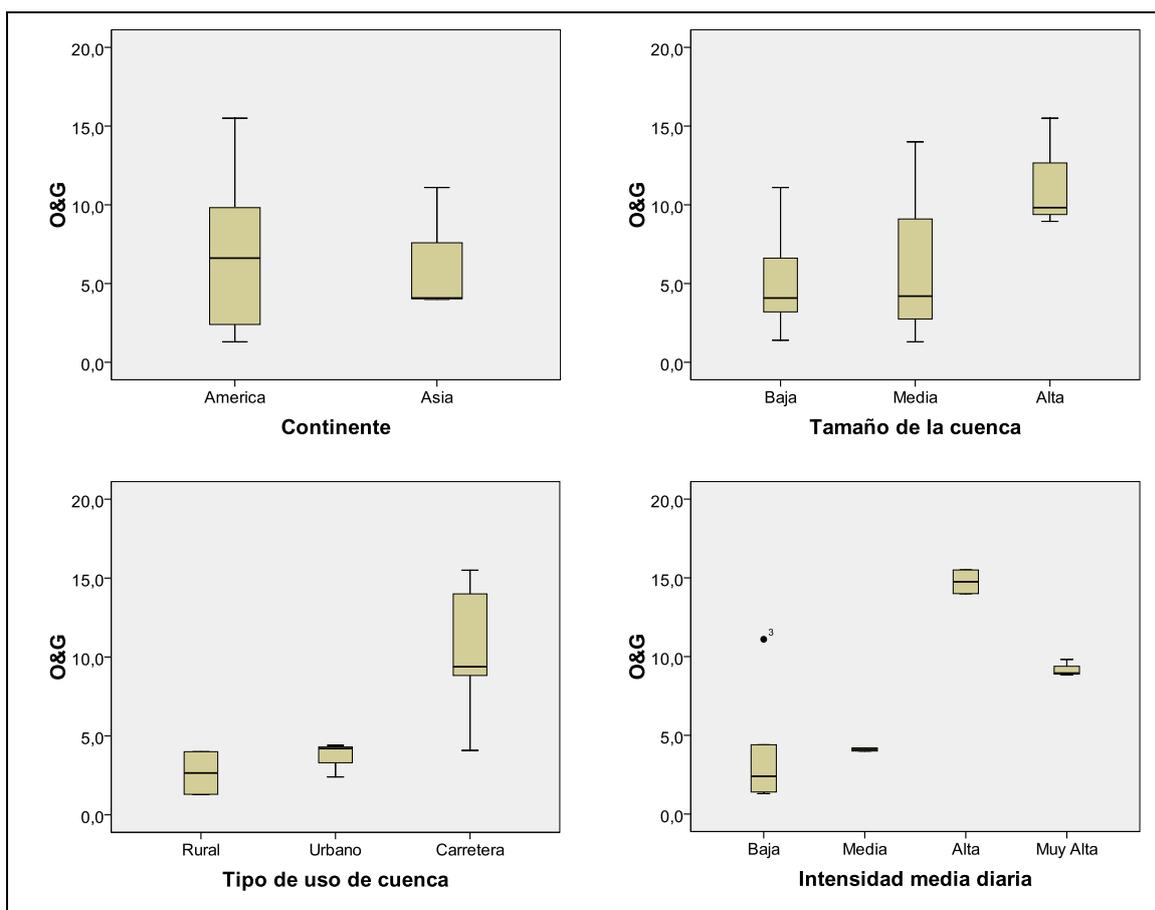


Gráfico 2.2. EMC de O&G según continente y características de la cuenca analizadas.

- **Zinc (Zn).** El resultado del análisis ANOVA (Milton y Arnold 2003) para Zn arrojó que existía una diferencia estadísticamente significativa en las EMC para los diferentes continentes. Aplicando el análisis Tukey (Box et al. 2005) se determinó que los datos pertenecientes al continente asiático son diferentes a los americanos y europeos, y que entre estos dos últimos no se aprecia diferencia estadísticamente significativa. Esto se aprecia en el Gráfico 2.3.

El análisis de la influencia de las distintas características de la cuenca da como resultado que no se aprecia diferencia estadística para la carga contaminante entre los distintos tamaños de cuenca, usos del suelo ni IMD (Gráfico 2.3).

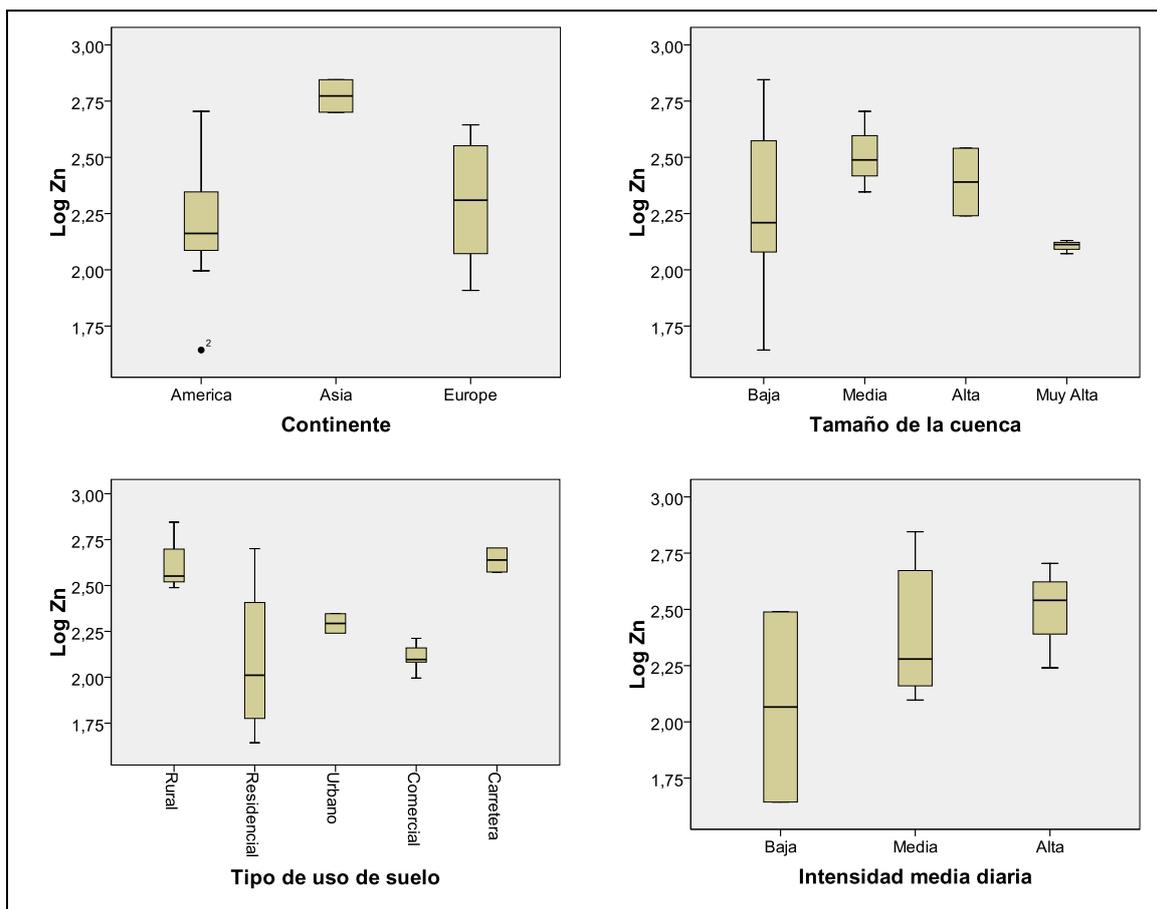


Gráfico 2.3. Log<sub>10</sub> EMC de Zn según continente y características de la cuenca analizada.

- **Cobre (Cu).** Como en el caso de los TSS, el análisis ANOVA (Milton y Arnold 2003) por continente indica que no hay diferencias entre los  $\text{Log}_{10}$  de las EMC de Cu, tal como se aprecia en el Gráfico 2.4.

El análisis sobre las diferentes características de la cuenca señala que no hay una diferencia estadísticamente significativa de los valores de EMC de Cu asociados al tamaño de la cuenca o al tipo de uso de suelo, pero sí existe en el caso de los asociados IMD (Gráfico 2.4).

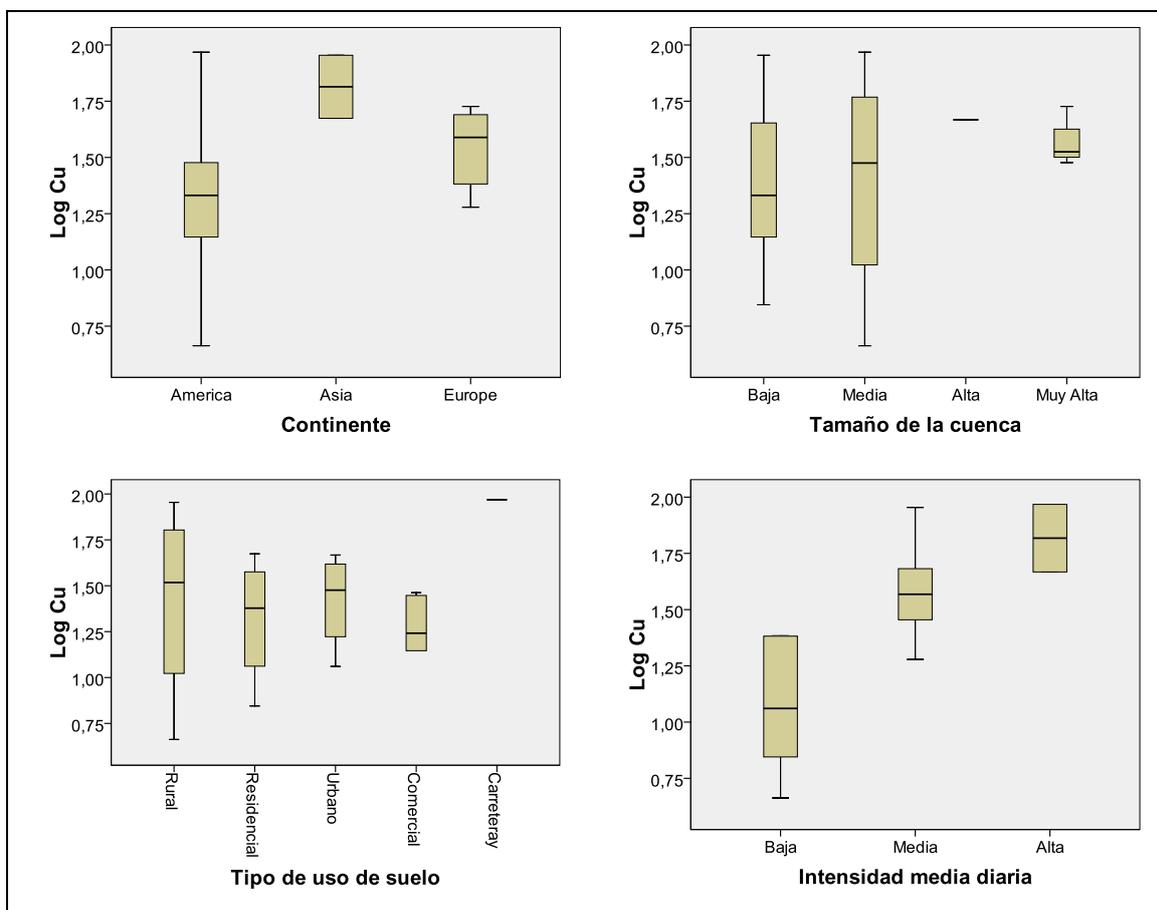


Gráfico 2.4.  $\text{Log}_{10}$  de EMC de Cu según las características de la cuenca analizadas.

La comparación de Tukey (Box et al. 2005) arroja que los valores de IMD considerados en la categoría *Baja* se diferencia de la categoría *Alta*. Sin embargo la categoría *Media* no presenta diferencias con las categorías *Alta* y *Baja*.

Así, los grupos extremos (*Alta* y *Baja*) pueden ser claramente diferenciados. En contraste, estos grupos no difieren de la categoría *Media*. Esto se explica porque cuando la IMD aumenta, la consecuencia es que la concentración de Cu aumenta, pero la tasa de crecimiento es pequeña, por lo que el punto de diferenciación se encuentra en alguna parte de la categoría *Media*. En consecuencia, se forman dos grupos, uno con la categoría *Baja* y *Media* y otro grupo que incluye las categorías *Media* y *Alta*.

➤ ***Demanda química de Oxígeno (DQO)***. En el caso de DQO se encontró que sólo Gnecco et al. (2005) había realizado un estudio de una cuenca con este factor en Europa, razón por la cual este continente no se incluyó dentro el análisis, quedando únicamente América y Asia en la comparación.

Los resultados de la Prueba T (Milton y Arnold 2003) para los continentes considerados indican que no hay diferencias entre las EMC de DQO, como se aprecia en el Gráfico 2.5.

A semejanza de lo ocurrido para otros contaminantes, el análisis no permite apreciar diferencias en la EMC para DQO para la mayoría de las categorías de las características de la cuenca. Sólo en el caso del tipo de uso de suelo aparecen diferencias significativas entre las diferentes categorías (Gráfico 2.5). La comparación de Tukey (Box et al. 2005a), para los tipos de uso de suelo indica que las EMC de las zonas urbanas son diferentes al del resto de tipos de uso de suelo considerados.

### ***Discusión del análisis de la concentración de contaminantes.***

La falta de diferenciación de las concentraciones de contaminantes para las distintas características estudiadas puede ser explicada por el hecho que todos los estudios fueron realizados sobre elementos más similares de lo esperado. Ciertamente el entorno no es el mismo en una zona rural que una urbana, pero en ambos casos se estudia lo que ocurre en los pavimentos

impermeables sobre los que hay un determinado tránsito. Por tanto, se estudia un mismo elemento en el que aparentemente las características estudiadas no tienen una gran relevancia en las mediciones realizadas.

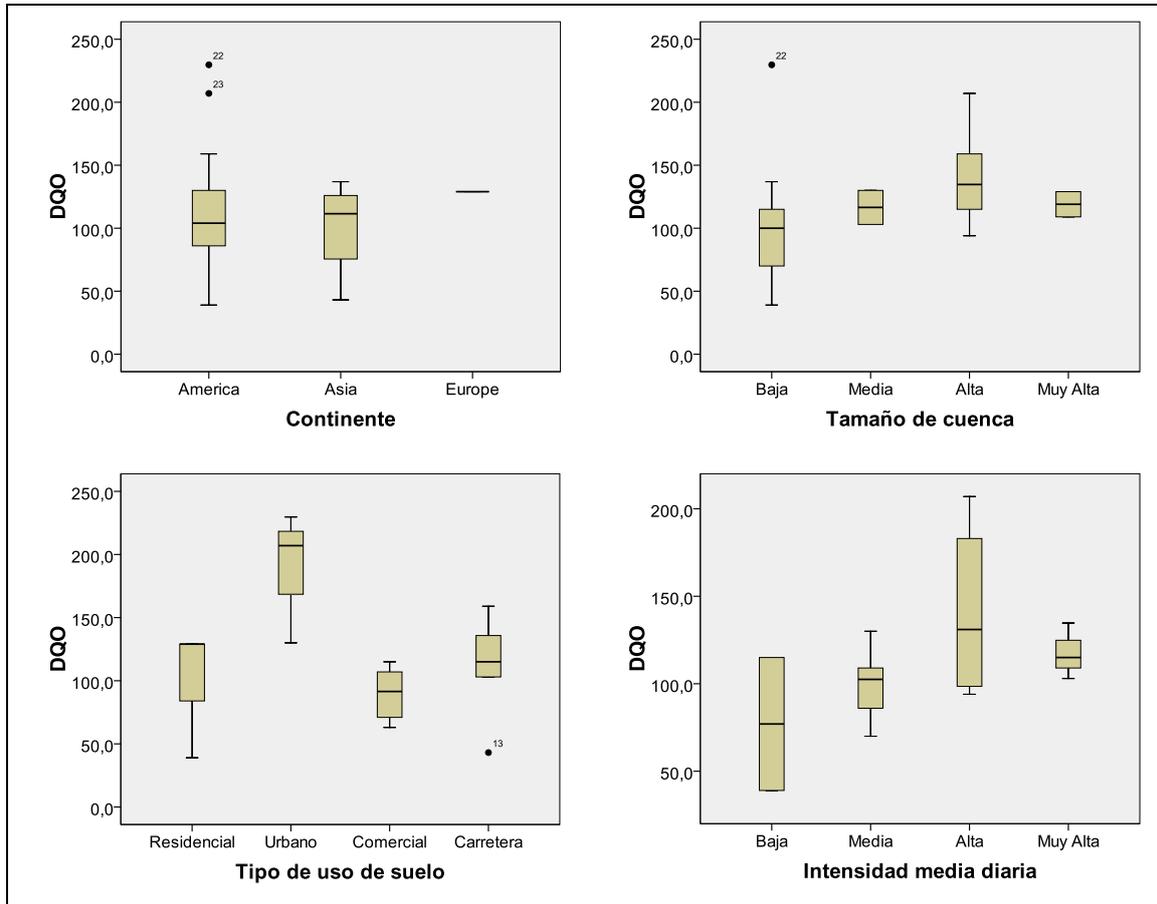


Gráfico 2.5. EMC de DQO según continente y características de la cuenca analizada.

Otro posible motivo por el cual no se observan diferencias en la concentración de contaminantes debido a las características estudiadas puede ser la acotación de la comparación a cuencas pequeñas (menos de 200 ha). En este tipo de cuencas los efectos como la densificación urbana no tendrían tanta relevancia, como a priori se puede suponer en cuencas mayores que abarquen zonas urbanas completas o zonas altamente industrializadas.

Un punto interesante a destacar es que la IMD es el único factor que muestra importantes diferencias estadísticas en los contaminantes O&G y Cu. En el caso de O&G los grupos son *Baja-Media-Muy Alta* y *Alta-Muy Alta*, y en Cu los grupos quedan conformados por las categorías *Baja-Media* y *Media-Alta*.

Con la información recopilada sobre el nivel de contaminación de la escorrentía es posible determinar la eficiencia de los sistemas de depuración de contaminantes para alcanzar los niveles aceptables según las normativas de vertido propias de cada lugar. Esto se realiza comparando los niveles aceptables de contaminación del país con la función de probabilidad acumulada (z) de la carga del contaminante en la escorrentía superficial según los datos recogidos en la base de datos confeccionada (Castillo Ron y Pruneda 2001).

Cuando se compara la concentración máxima permitida en los cuerpos de agua receptores en EEUU (National Recommended Water Quality Criteria 2005) y en UE (Directiva 2000/60/CE del Parlamento Europeo) con los valores de concentración de los estudios analizados, se observa que las eficiencias de depuración requeridas para poder realizar los vertidos de aguas pluviales al medio natural son en general altas (sobre 70 %). En la Tabla 2.2 se muestran los valores de eficiencia para alcanzar los valores de las normas en el 50 % y el 95 % de los casos en EEUU y UE., de acuerdo a la probabilidad acumulada (z).

Tabla 2.2. Eficiencia de remoción de contaminantes para EE.UU y UE según el caso.

Contaminante	Eficiencia de depuración necesaria en el 50 % de los casos		Eficiencia de depuración necesaria en el 95 % de los casos	
	EEUU	UE	EEUU	UE
TSS	71	71	91	91
Zn	35	84	80	95
Cu	76	93	84	95
DQO	99		99	

Esta información es especialmente importante ya que permite estimar cuáles deben ser las eficiencias mínimas exigibles a los sistemas de drenaje y depuración de aguas pluviales. Así, por ejemplo se puede pensar en exigir un 90% de eficiencia en la depuración de TSS y un 95 % para Zn lo que aseguraría conseguir niveles de carga de contaminantes en las aguas en valores aceptados por las normas de Europa en el 95 % de los casos.

### 2.3 Fundamentos del sistema de alcantarillado.

El sistema de alcantarillado usado ya en el siglo XVI consistía en captar y transportar las aguas negras y de escorrentía superficial por una única red de tuberías hacia un cuerpo de agua cercano donde éstas se vertían. Por tratarse de un sistema que juntaba los dos tipos de agua residual urbana recibió el nombre de sistema unitario (Faram 2000).

Dicho sistema es el más empleado en las ciudades de los países europeos. Con el paso del tiempo algunas de estas redes se han vuelto inefectivas e ineficientes a pesar de su desarrollo (Scholz y Grabowiecki 2007).

Un problema bien conocido de estas redes es que se vuelven incapaces de conducir los caudales generados por los eventos de tormenta particularmente intensos, produciéndose desbordes o fallos hidráulicos en distintos puntos y las consecuentes inundaciones en las zonas urbanas (Castro Fresno et al. 2005; Faram 2000).

Un sistema de alcantarillado diferente se empleó en América y Australia. Este sistema consiste en conducir las aguas negras y de escorrentía superficial por diferentes redes de tuberías, por lo que se le denomina sistema separativo (Faram 2000).

La filosofía de utilizar un sistema separativo consiste en tratar, por un lado, el agua de desecho procedentes de las viviendas y, por otro, retornar el agua de escorrentía superficial al medio ambiente sin tratamiento, bajo el supuesto que esta última tendría una baja carga contaminante. Sin embargo, esta asunción ha cambiado fuertemente en los últimos años (Faram 2000), debido a la consideración de la contaminación difusa como un problema ambiental (ver puntos 2.1 y 2.2).

Cualquiera que sea el tipo de sistema utilizado para gestionar las aguas de escorrentía superficial, se busca alejar esta agua de las personas, estructuras e infraestructuras de transporte lo más rápido y eficientemente posible, siendo las consecuencias más representativas de estos sistemas las citadas por Jones (Jones et al. 2005):

- ◆ Incremento de la frecuencia, volumen y duración de la escorrentía superficial.
- ◆ Grandes picos de descarga y velocidades del flujo.
- ◆ Cambios en el régimen de flujo base (tiempo seco).
- ◆ Incremento del riesgo de desbordes.
- ◆ Incremento de la temperatura de la escorrentía directa.
- ◆ Pérdida de zonas ribereñas y humedales, con pérdida de hábitats terrestres y aviar.
- ◆ Hábitats dañados y trastornos en los ecosistemas asociados a la erosión del lecho y las laderas de los ríos, ocasionando el transporte de sedimentos y contaminantes, aumento del ancho del canal y su inestabilidad, y la destrucción de los hábitats acuáticos y terrestres.
- ◆ Introducción de nuevas fuentes y tipos de emisiones contaminantes.
- ◆ Aumentó del transporte de contaminantes y degradación de la calidad del agua.
- ◆ Aparición de un incremento de la concentración de contaminantes potencialmente tóxicas en los cuerpos de agua receptores y a largo plazo.

## 2.4 Introducción al concepto de Drenaje Sostenible.

La gestión de la escorrentía superficial en áreas urbanas ha derivado a una aproximación sostenible. La filosofía que hay detrás de esta aproximación es la de gestionar las aguas pluviales lo más próximo al lugar en que caen y a la vez utilizar el recurso para recargar acuíferos, aprovechamiento en usos no potables, y permitir realizar un tratamiento de volúmenes menores de agua de escorrentía con cargas contaminantes (Åstebøl et al. 2004; Castro Fresno et al. 2005; Castro Fresno y Ballester Muñoz 2006; Castro Fresno et al. 2006).

Como ejemplo de la aplicación de esta filosofía, se pueden citar los casos de Noruega, Suecia y Dinamarca en donde el agua pluvial es usada en recreación y en el desarrollo de ecosistemas y paisajes (Scholz y Grabowiecki 2007).

Las técnicas y metodologías que tienen esta orientación sostenible reciben diferentes nombres según los países (Castro Fresno et al. 2005; Rodríguez Hernández 2008; Perales Momparler y Andrés-Doménech 2008):

- ♦ Sustainable Urban Drainage System (SUDS) en Reino Unido.
- ♦ Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS) ó Técnicas de Drenaje Urbano Sostenible (TDUS) en España.
- ♦ Stormwater Best Management Practice (BMPs) en EEUU.
- ♦ Water Sensitive Urban Design (WSUD) en Australia.
- ♦ Mejores Prácticas de Control (MPC) en Hispanoamérica.
- ♦ Técnicas Alternativas de Drenaje (TAD) en Chile.

Estas técnicas y metodologías pueden agruparse en dos categorías principales:

- ♦ Medidas de gestión.
- ♦ Medidas estructurales.

### ***Medidas de gestión.***

Estas medidas corresponden a actuaciones en educación y concienciación de los ciudadanos sobre la importancia del buen uso y cuidado de los diferentes sistemas de drenaje sostenible.

También se incluye dentro de las medidas de gestión la formación y divulgación de las metodologías y técnicas de estos sistemas de drenaje, dirigidas hacia los profesionales responsables de los diseños y a las autoridades para permitir los ajustes necesarios en las legislaciones a fin de fomentar el uso del drenaje sostenible (Jiménez Gallardo 1999; Perales Momparler y Andrés-Doménech 2008).

### ***Medidas estructurales.***

Las medidas estructurales son la aplicación de las técnicas y metodologías de drenaje sostenible a lugares y situaciones específicas. Esta categoría se puede subdividir en diversos subconjuntos, dependiendo del autor a que se haga referencia (Rodríguez Hernández 2008).

## **2.5 Clasificación propuesta de los diferentes sistemas de drenaje sostenible**

Como compendio de las diferentes clasificaciones realizadas de las medidas estructurales por los diferentes autores (Rodríguez Hernández 2008; Perales Momparler y Andrés-Doménech 2008), se propone la siguiente clasificación:

- ♦ Sistemas integrados en el paisaje.
- ♦ Sistemas integrados en el drenaje convencional.

### **2.5.1 Sistemas integrados en el paisaje.**

Los sistemas integrados en el paisaje son los más asociados a las soluciones sostenibles, debido a su visibilidad y a que pasan a formar parte del paisaje, llegando incluso a producir algunas modificaciones en él.

---

### ***Estructuras de drenaje.***

Corresponden a estructuras que permiten la salida de las aguas pluviales a través de ellas. Algunas de ellas tienen como función simplemente el permitir un flujo bajo la superficie conduciendo las aguas hacia un sistema de canalización o de infiltración. Otras son un sistema que capta las aguas en la superficie con la finalidad de propiciar la infiltración en el terreno natural.

Existen diversas estructuras de este tipo, entre las que se pueden señalar:

- ***Superficies permeables.*** Son superficies artificiales que permiten el paso del agua a través de ellas. Dependiendo de la finalidad y diseño de estas superficies el agua puede ser infiltrada si todas las capas del firme son permeables o evacuada si sólo la capa superficial o parte de las capas sub-superficiales son porosas. En este último caso, las aguas son vertidas en algún otro elemento ya sea de conducción, drenaje o infiltración. Las tipologías más comunes de superficies permeables son los pavimentos continuos porosos, bloques y baldosas porosas, bloques impermeables con juntas permeables, gravas y césped con o sin refuerzo. Algunos de estos sistemas se muestran en la Figura 2.1 (Rodríguez Hernández 2008; Perales Momparler y Andrés-Doménech 2008).
- ***Cubiertas vegetadas.*** Son sistemas concebidos para recubrir tejados y terrazas, interceptando y reteniendo las aguas pluviales mediante varias capas, siendo vegetadas las superficiales. El efecto producido por estas cubiertas es la reducción del volumen de escorrentía y la atenuación de los caudales pico, así como la retención de los contaminantes y el aislamiento térmico en los edificios (Figura 2.2) (Perales Momparler y Andrés-Doménech 2008).
- ***Pozos y zanjas de infiltración.*** Son perforaciones o trincheras realizadas en el terreno y rellenas con material drenante con un alto índice de huecos. Están concebidas para recibir, absorber, almacenar e infiltrar las aguas de escorrentía superficial de una zona impermeable adyacente generada por una tormenta de diseño. Los pozos y las zanjas se diferencian en que estas últimas son más estrechas y menos

profundas que los primeros (Rodríguez Hernández 2008; Perales Momparler y Andrés-Doménech 2008).

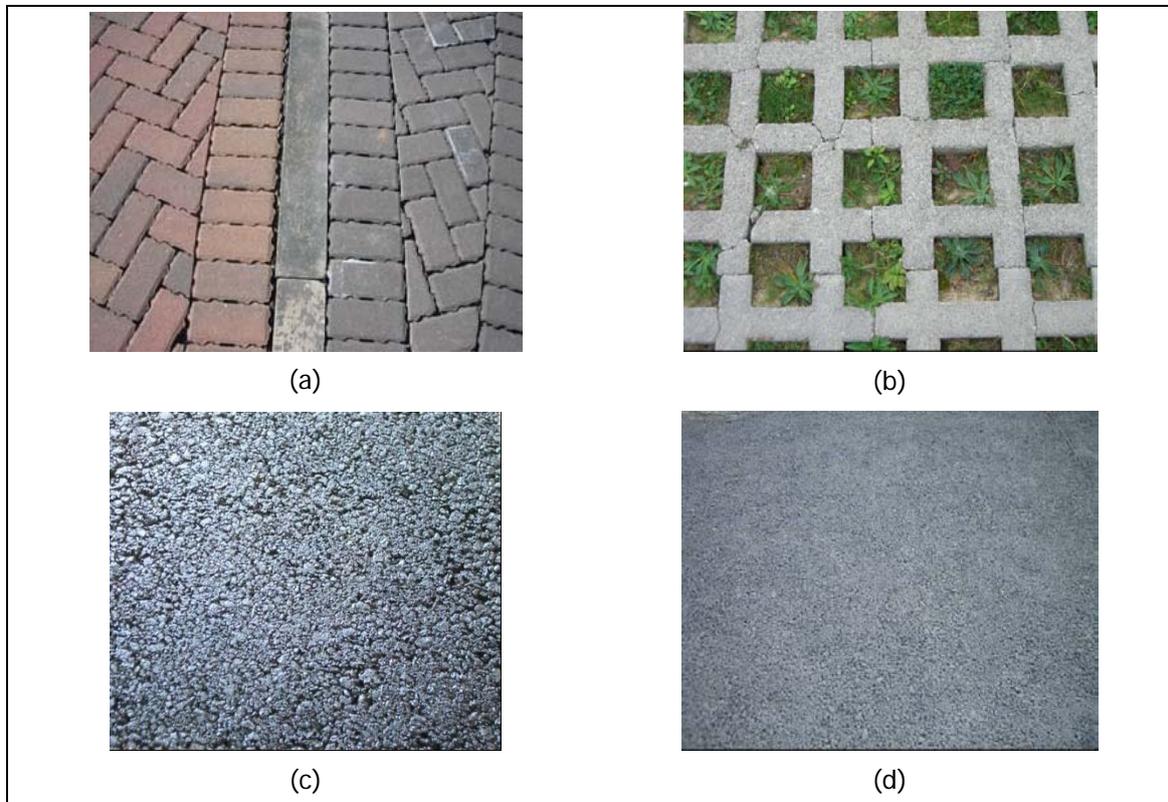


Figura 2.1. Algunas tipologías de superficies permeables: (a) pavimento de bloques, (b) césped reforzado, (c) asfalto poroso y (d) hormigón poroso (Perales Momparler y Andrés-Doménech 2008).



Figura 2.2. Cubiertas vegetadas (Perales Momparler y Andrés-Doménech 2008).

- ***Drenes filtrantes.*** Son zanjas recubiertas de geosintético y rellenas de material drenante. El objetivo de estos drenes es captar y conducir las aguas de escorrentía superficial o de una tubería de aportación hacia otro sistema de drenaje. En algunos casos se incorpora una tubería permeable en la zona de material drenante con la finalidad de facilitar la circulación de agua en su interior (Castro Fresno et al. 2005; Rodríguez Hernández 2008; Perales Momparler y Andrés-Doménech 2008).
  
- ***Franjas filtrantes.*** Son franjas de superficies vegetadas que tienen poca pendiente, diseñadas para que la escorrentía superficial fluya lentamente, facilitando los procesos de filtrado, evapotranspiración e infiltración del agua. La baja velocidad con que circula el flujo permite que las partículas en suspensión y algunos contaminantes presentes en el agua sedimenten o queden atrapados en la vegetación (Figura 2.3) (Castro Fresno et al. 2005; Rodríguez Hernández 2008; Perales Momparler y Andrés-Doménech 2008).



Figura 2.3. Franja filtrante (Perales Momparler y Andrés-Doménech 2008).

### ***Elementos de retención superficial de las aguas.***

Corresponde a elementos o estructuras que tienen como finalidad almacenar temporalmente el agua de escorrentía, logrando un efecto de amortiguación de los caudales pico por medio de la laminación de los flujos afluentes. Los tiempos de retención pueden ser de algunos minutos hasta varios días, siendo la intención en este último caso mantener una lámina de agua que generalmente es de carácter ornamental.

Entre los elementos de retención superficial de las aguas se pueden contar:

- ***Depósitos de infiltración.*** Son depresiones vegetadas de terreno que al recibir el flujo de agua de escorrentía superficial se transforman en embalses superficiales. Su forma es irregular con una base ancha y taludes suaves. Están concebidos para permitir el almacenamiento y la infiltración gradual de la escorrentía superficial. Además, facilitan la eliminación de contaminantes mediante filtración, adsorción y transformaciones biológicas (Figura 2.4) (Castro Fresno et al. 2005; Rodríguez Hernández 2008; Perales Momparler y Andrés-Doménech 2008).



Figura 2.4. Depósitos de infiltración (Perales Momparler y Andrés-Doménech 2008).

- ***Cunetas verdes.*** Son estructuras lineales vegetadas que captan y conducen la escorrentía superficial hacia un sistema de drenaje existente. Tienen base ancha y pendientes bajas que permiten conseguir velocidades de escurrimiento bajas facilitando la oxigenación y la infiltración del agua, así como la sedimentación de contaminantes (Figura 2.5) (Castro Fresno et al. 2005; Rodríguez Hernández 2008; Perales Momparler y Andrés-Doménech 2008).



Figura 2.5. Cuneta verde (Perales Momparler y Andrés-Doménech 2008).

- ***Depósitos de detención superficial.*** Son depresiones superficiales del terreno diseñadas para almacenar temporalmente la escorrentía superficial y amortiguar los caudales pico. Además, al disminuir la velocidad de desplazamiento del flujo de agua favorece la precipitación de los sólidos en suspensión y otros contaminantes, reduciendo los niveles de contaminación del efluente. A diferencia de los depósitos de infiltración, estos depósitos no están diseñados para facilitar la infiltración hacia las capas inferiores (Figura 2.6) (Castro Fresno et al. 2005; Rodríguez Hernández 2008; Perales Momparler y Andrés-Doménech 2008).



Figura 2.6. Depósito de detención superficial (Perales Momparler y Andrés-Doménech 2008).

➤ ***Estanques de retención.*** Son lagunas artificiales que mantienen una lámina de agua de forma permanente. En los estanques de retención se mantiene una vegetación acuática, tanto emergente como sumergida. Están diseñados para que tengan tiempos de retención hidráulica altos, facilitando la sedimentación y absorción de nutrientes por la plantas. Una condición de estas estructuras es que tienen una capacidad de almacenamiento de agua mayor al volumen que usualmente se encuentra en ellos, permitiendo una amortiguación de los caudales pico de la escorrentía superficial que recibe durante los eventos de precipitación. Adicionalmente, el volumen de agua permanente oculta los bancos de sedimentos antiestéticos, mejorando el entorno general del paisaje (Figura 2.7) (Castro Fresno et al. 2005; Rodríguez Hernández 2008; Perales Momparler y Andrés-Doménech 2008).

➤ ***Humedales artificiales.*** Son superficies de terreno cubiertas de una capa de agua con poca profundidad y con un elevado tiempo de retención, mayor que el de los estanques de retención. Contienen una gran cantidad de masa vegetal, tanto sumergida como emergente, que normalmente es propia de pantanos y zonas húmedas. Esta gran cantidad de vegetación hace que tengan un alto grado de eliminación

de nutrientes y de depuración biológica. Además, aportan potencial ecológico, estético, educacional y recreativo (Figura 2.8) (Castro Fresno et al. 2005; Rodríguez Hernández 2008; Perales Momparler y Andrés-Doménech 2008).



Figura 2.7. Estanque de retención (Perales Momparler y Andrés-Doménech 2008).



Figura 2.8. Humedal artificial (Perales Momparler y Andrés-Doménech 2008).

### 2.5.2 Sistemas integrados en el drenaje convencional.

Los sistemas integrados en el drenaje convencional corresponden a elementos que están diseñados como complementos a utilizar en las redes convencionales de captación y transporte de aguas pluviales. Esto hace que en general no sean visibles como en el caso de los sistemas integrados en el paisaje.

Los distintos elementos pueden ser agrupados como:

- **Cestas de desbaste.** Corresponden a un enrejado de alambre o plástico, que generalmente tienen forma de cesta, instaladas en los puntos de entrada del sistema de drenaje. El objetivo de este sistema es retener la basura que es arrastrada por la escorrentía superficial. El tamaño de los elementos retenidos depende del tamaño de la abertura del enrejado (Figura 2.9) (Begum et al. 2008).



Figura 2.9. Cesta de desbaste (Grate Inlet Skimmer Box™, Suntree Technologies 2009).

- **Trampa de sedimentos.** Son elementos diseñados para retener el sedimento arrastrado por el agua de escorrentía superficial. La retención se consigue por medio de la decantación de los sedimentos en el interior del elemento (Figura 2.10).

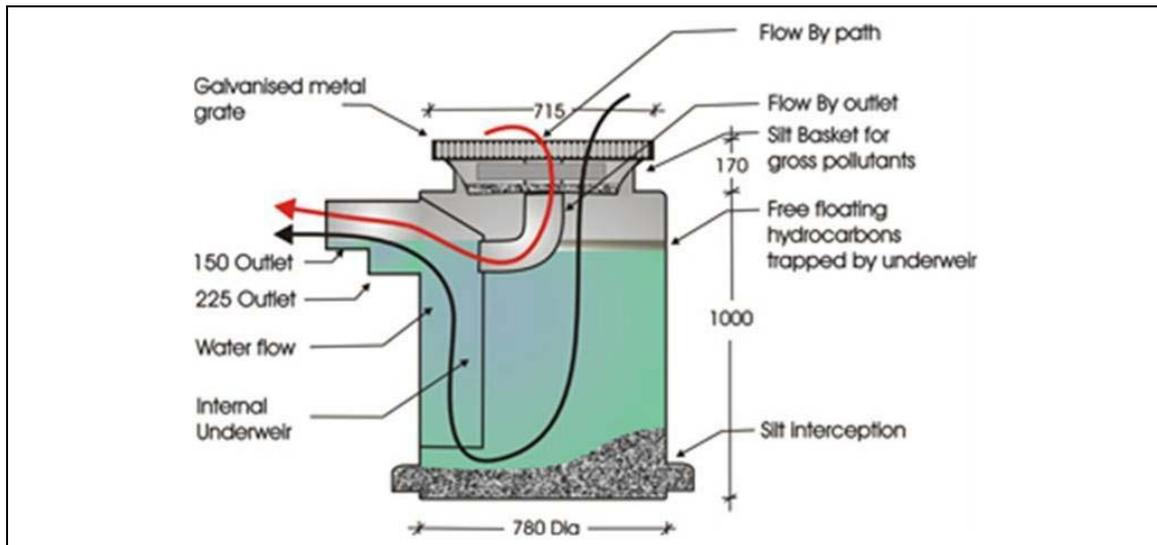


Figura 2.10. Trampa de sedimentos (Bulbeck Envirosolutions 2009).

- **Separadores hidrodinámicos.** Son un tipo especial de trampas de sedimentos que por su complejidad hidráulica da lugar a una categoría aparte. Utilizan un flujo rotacional o vórtice para forzar la precipitación de los sedimentos (Figura 2.11).

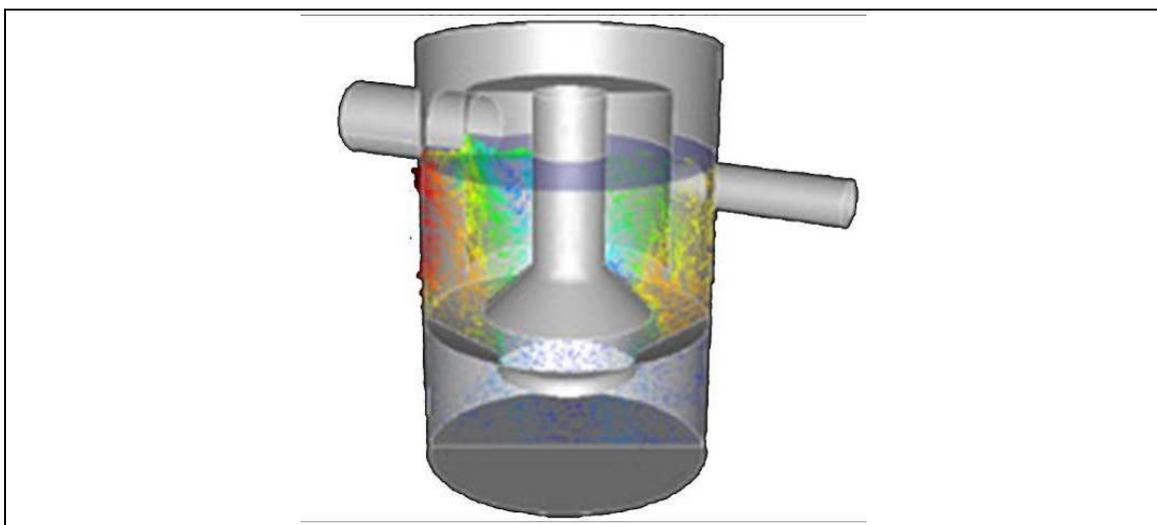


Figura 2.11. Separador hidrodinámico (Downstream Defender®, Hydro International 2009).

➤ **Separadores de aceites y sedimentos.** Corresponden a elementos que separan el aceite del agua de escorrentía mediante la retención temporal del agua y la diferencia de densidades entre el agua y el aceite. Tienen una barrea que fuerza el paso del agua por debajo de ella, reteniendo de esta forma los aceites en la parte superior anterior a dicha barrera. La retención, además, hace que el flujo sea más lento facilitando la precipitación de los sedimentos (Figura 2.12).

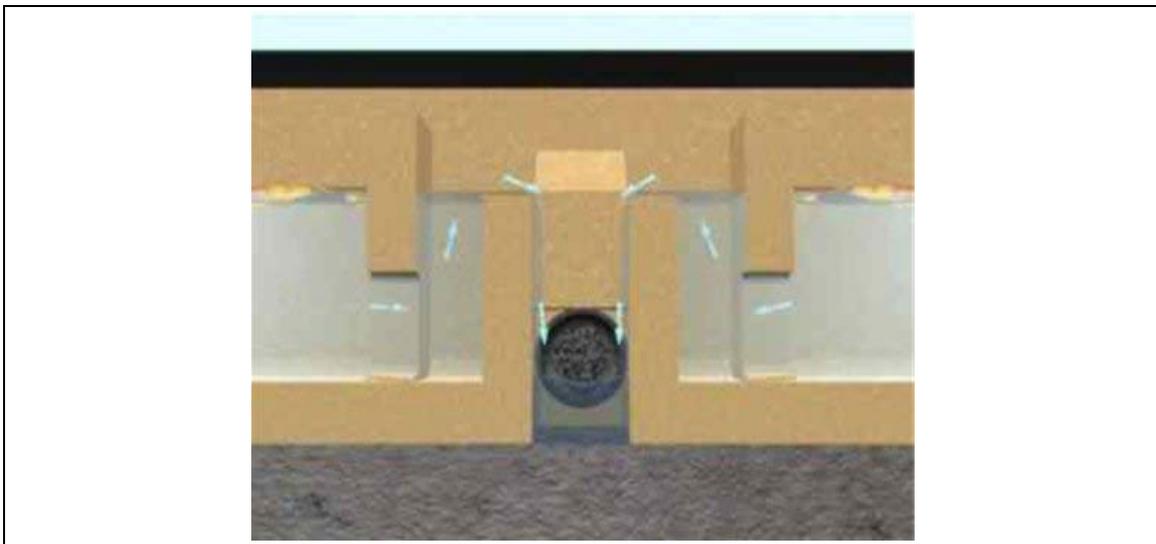


Figura 2.12. Separador de aceites y sedimentos (Permachannel®, Permavoid Limited 2006)

A modo de permitir una mejor visión de la clasificación, en la Tabla 2.3 se presenta un resumen de ella.

Estos sistemas de drenaje han sido probados en diversos países y se ha estudiado su capacidad de depuración para diferentes contaminantes. Los resultados que se han obtenido señalan que tienen una capacidad dispar en función del tipo de contaminante, y en algunos casos se da que la carga contaminante en el efluente es mayor que en afluente (Lundberg et al. 1999; Hossain et al. 2005; Boving y Neary 2006a; Boving y Neary 2006b).

Tabla 2.3. Resumen de la clasificación de los sistemas de drenaje sostenible de aguas pluviales.

Sistemas integrados al paisaje	Estructuras de drenaje	Superficies permeables Cubiertas vegetadas Pozos y zanjas de infiltración Drenes filtrantes Franjas filtrantes
	Elementos de retención superficial de las aguas	Depósitos de infiltración Cunetas verdes Depósitos de detención superficial Estanques de retención Humedales artificiales
Sistemas integrados en el drenaje convencional		Cestas de retención Trampas de sedimentos Separadores hidrodinámicos Separadores de aceites y sedimentos

Una investigación sobre la eficacia del funcionamiento de este tipo de dispositivos llevada a cabo por el Departamento de Transportes de California (California Department of Transportation, CALTRANS 2007) concluye que la mayoría de los sistemas no tienen un rendimiento satisfactorio y que, además, tienen un bajo nivel de confianza en su nivel de tratamiento.

Por tanto, es pertinente realizar nuevos estudios orientados a mejorar los diseños la capacidad de depuración de los sistemas de drenaje y los niveles de confianza de los tratamientos asociados.



### 3 METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN.

#### 3.1 Diseño y construcción del prototipo de un nuevo sistema de drenaje sostenible: SCPT.

En esta parte de la investigación el objetivo era diseñar y construir un prototipo a escala real de un Sistema de Captación, Pretratamiento y Tratamiento (SCPT) de aguas pluviales contaminadas, especialmente diseñado y construido para su análisis en laboratorio. Como complemento de este sistema se simuló el arrastre de sedimentos presentes en pavimentos impermeables mediante una rampa diseñada específicamente para dicho fin. A continuación se describe la metodología de diseño, los elementos del SCPT y sus complementos.

##### 3.1.1 Diseño del SCPT.

El SCPT está concebido como un sistema de drenaje sostenible integrado en el drenaje convencional, dentro de la categoría separador de sedimentos y aceites (ver punto 2.5.2). Estos sistemas presentan problemas para mantener una eficiencia aceptable, especialmente debido a la resuspensión de los contaminantes atrapados. Como estas resuspensiones se producen cuando el sistema cuenta con un nivel de agua bajo el mínimo necesario para mantener su operación, el sistema propuesto tiene un sistema de filtrado especialmente diseñado que evita que esta situación se produzca.

La geometría del SCPT se define principalmente su superficie. El cálculo de ésta se hace mediante el procedimiento habitual para un decantador de sólidos, esto es, por medio de la utilización de la ecuación de Stokes para la sedimentación de una partícula discreta (Ecuación 3.1):

$$V_s = \frac{g}{18} * \frac{d_p}{\nu} * (\delta - 1)$$

**Ecuación 3.1**

Donde:

- $V_s$  : Velocidad de sedimentación de la partícula.  
 $\nu$  : Viscosidad cinemática del agua.  
 $\delta$  : Densidad de la partícula.

Además, como parte de las hipótesis de cálculo se considera que:

- ♦ El flujo en el interior del SCPT es uniforme.
- ♦ La concentración de partículas de cada tamaño es la misma en todos los puntos de la sección de entrada.
- ♦ Las partículas sedimentan sin interferencias y una vez que las partículas llegan al fondo no vuelven a ser arrastradas por el flujo.

Como el flujo es uniforme en el interior del SCPT el tiempo de permanencia de las partículas en él está dado por la Ecuación 3.2.

$$t_0 = \frac{\tau}{Q} \quad \text{Ecuación 3.2}$$

Donde:

- $t_0$  : tiempo de permanencia.  
 $\tau$  : volumen interior del SCPT.  
 $Q$  : caudal de diseño.

Si se reemplaza  $\tau$  por la altura ( $h_0$ ) y la superficie ( $\Omega$ ) en la Ecuación 3.2 se tiene la igualdad mostrada en la Ecuación 3.3.

$$t_0 = \frac{\tau}{Q} = \frac{h_0}{V_s} \quad \text{Ecuación 3.3}$$

Haciendo las reducciones adecuadas se obtiene la Ecuación 3.4

$$V_s = \frac{Q}{\Omega} \quad \text{Ecuación 3.4}$$

Ahora, utilizando la Ecuación 3.1 y Ecuación 3.4 se puede determinar la superficie mínima necesaria para la decantación de una partícula de sólido de diámetro dado. El diámetro de la partícula que será decantada es de  $36 \mu\text{m}$ , que es la mitad del diámetro de la partícula de sedimento que se considera como sólido en suspensión.

El caudal de diseño se determina según el método racional expresado por la Ecuación 3.5.

$$Q = \frac{C * i * A}{3.600} \quad \text{Ecuación 3.5}$$

Donde:

- Q: Caudal (l/s)
- C: Coeficiente de escorrentía (adimensional).
- i: Intensidad de la precipitación (mm/hr).
- A: Área de la cuenca ( $\text{m}^2$ ).

El área aportante de la escorrentía directa considerada es de  $200 \text{ m}^2$ . Esta área corresponde a una zona de aparcamiento para 10 vehículos y la calle de tránsito. La lluvia de diseño corresponde a una de 10 minutos de tiempo de concentración y 25 años de tiempo de retorno para la zona de Santander. En este escenario, el caudal de diseño es de 5,5 l/s.

Esto implica que la superficie del SCPT ( $\Omega$ ) debe ser de  $0,92 \text{ m}^2$ . Adoptándose un ancho de  $0,80 \text{ m}$  el largo mínimo requerido es de  $1,15 \text{ m}$ . Sin embargo, se adopta un largo de  $1,30 \text{ m}$  para asegurar la precipitación de la partícula de diseño.

Como se desprende de la Ecuación 3.4, la sedimentación no depende de la altura del SCPT por lo que puede ser escogida arbitrariamente. En este caso se adoptó  $1,00 \text{ m}$  para facilitar el manejo de los distintos elementos a emplear en el SCPT.

Antes de la construcción del prototipo definitivo, se analizó el movimiento del agua dentro del SCPT. Este análisis se hizo mediante el método elementos finitos con el programa Ansys CFX 10.0. El objetivo era realizar una estimación de las velocidades del agua que se producen dentro del prototipo SCPT y, así, detectar posibles anomalías que requiriesen de alguna modificación antes de la materialización del SCPT.

Las velocidades estimadas en la simulación resultaron ser lo suficientemente bajas como para facilitar la precipitación de los sólidos, tal como se aprecia en la Figura 3.1.

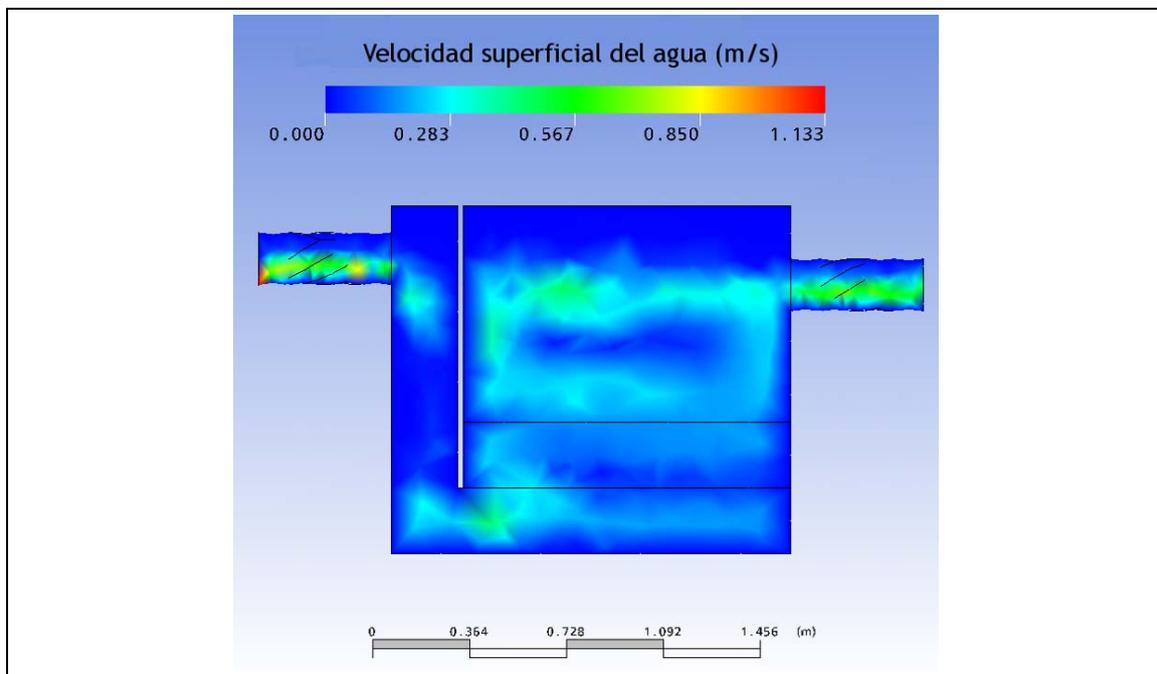


Figura 3.1. Velocidades estimadas dentro del Sistema de Captación, Pretratamiento y Tratamiento (SCPT) mediante Ansys CFX 10.0.

### 3.1.2 Elementos principales del SCPT.

#### *Estructura principal.*

El cuerpo del prototipo de SCPT se construyó en metacrilato. Consiste en una estructura de 0,8 m de ancho, 1,3 m de largo y 1,0 m de alto. En su pared frontal cuenta con una abertura de 0,2 m de alto por 0,5 m de ancho que permite la entrada del caudal afluente. Así mismo, en la pared trasera cuenta con una abertura circular de 0,2 m de diámetro para la salida del agua (Figura 3.2).



Figura 3.2. Estructura de metacrilato del prototipo de SCPT.

La altura del centro de la abertura de salida está alineada con la parte más baja de la abertura rectangular de entrada, lo que asegura una pendiente hidráulica hacia la salida. El SCPT cuenta con desagüe de fondo normalmente taponado. La función de este desagüe es permitir el vaciado del SCPT durante las operaciones de limpieza del sistema en laboratorio.

Dentro de la estructura de metacrilato se emplazan una pantalla y un sistema de filtrado (Figura 3.3). El SCPT está configurado para que se cree una zona de decantación bajo el sistema de filtrado y que el flujo de agua atraviese en forma ascendente este mismo sistema.

Por su tamaño y los esfuerzos a los que puede estar sometida la estructura durante algunos ensayos, ésta requiere unos refuerzos laterales para evitar el abombamiento de las paredes de metacrilato.

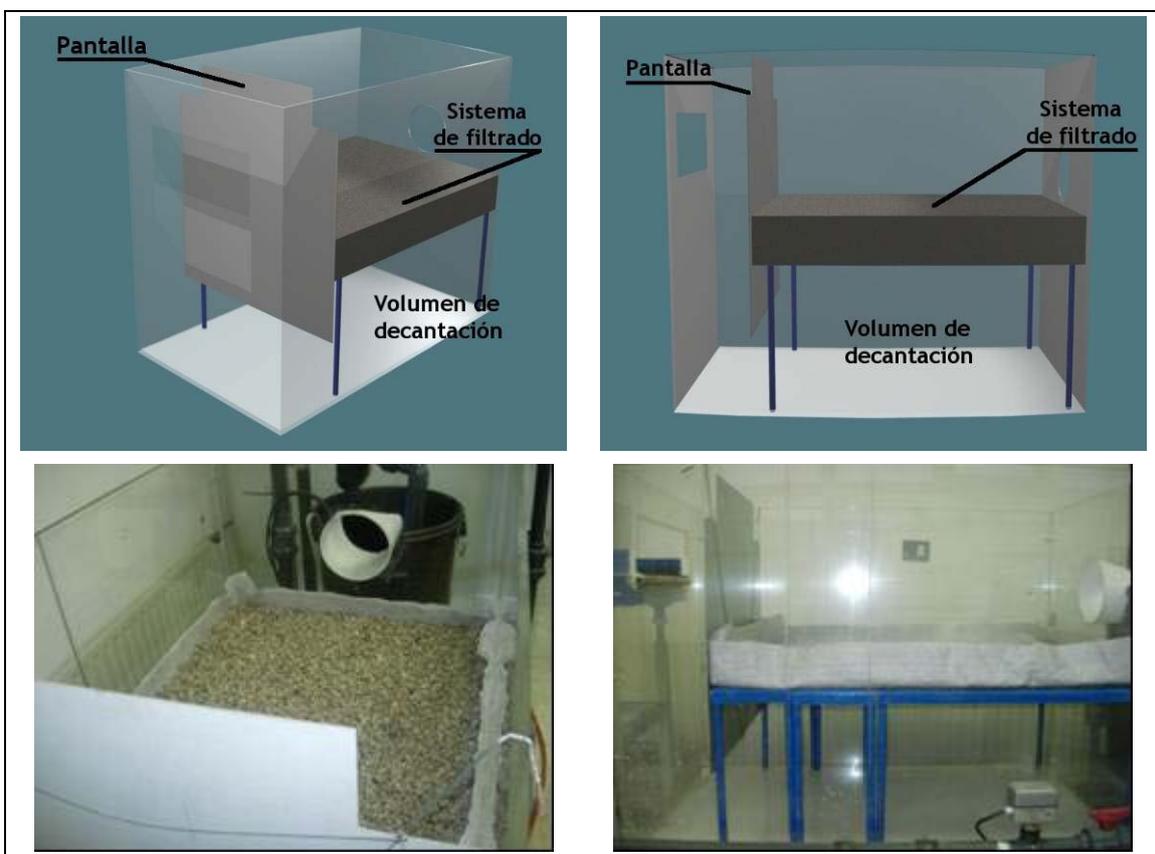


Figura 3.3 Configuración del prototipo del SCPT.

### ***Pantalla interior.***

La pantalla tiene una doble función: disipar la energía del caudal afluente y dividir la zona interior de la estructura de metacrilato en dos partes. La primera parte funciona como un tapón hidráulico similar al de los separadores

de aceite. La segunda contiene una zona que se ha denominado volumen de decantación y el sistema de filtrado (Figura 3.4).

La pantalla tiene 0,8 m de ancho, 0,75 m de alto y 0,004 m de espesor y está fabricada en chapa galvanizada. Las esquinas superiores han sido eliminadas, dejando una abertura de 0,12 m de ancho por 0,13 m de alto. Estas aberturas están diseñadas a modo de aliviadero superior que entraría en funcionamiento únicamente ante un excesivo flujo afluente.

La pantalla se inserta en unos surcos guías ubicados en la parte interior de las paredes laterales de la estructura de metacrilato del SCPT. Estos surcos permiten tres posiciones de ensayo con la pantalla a 0,70 m; 0,90 m y a 1,10 m de la pared trasera, donde se encuentra la salida del agua.

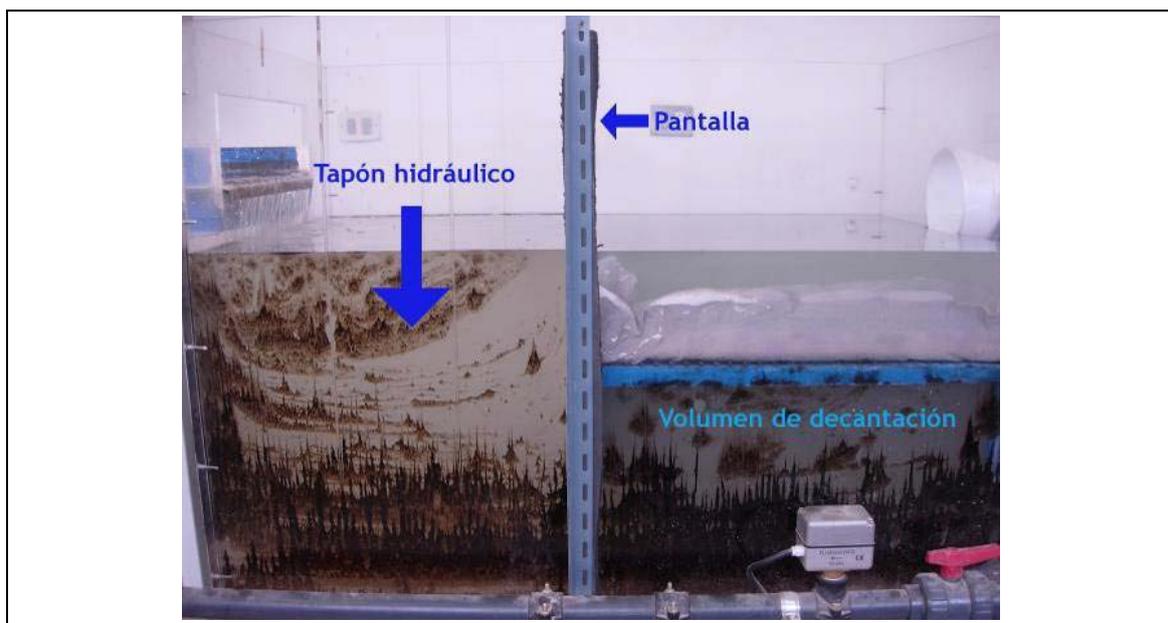


Figura 3.4. Pantalla, tapón hidráulico y volumen de decantación del SCPT.

Una vez que el nivel de agua dentro de la estructura principal ha alcanzado la pantalla, la zona del tapón hidráulico comienza a retener los aceites arrastrados por la escorrentía. Esta zona tiene un ancho de 0,8 m y un largo variable en función de posición de la pantalla. El agua es forzada a pasar bajo la pantalla debido al gradiente hidráulico que se ha impuesto en el diseño del SCPT, por lo que se produce un flujo descendente.

El volumen de decantación, situado tras la pantalla, es la parte del SCPT donde se produce una zona de aguas quietas y flujo ascendente hacia el sistema de filtrado. En esta zona es donde la mayor parte de los sólidos arrastrados por el agua precipitan en el fondo. Esta zona tiene un ancho de 0,80 m y, al igual que la zona del tapón hidráulico, un largo variable en función de la posición de la pantalla.

La parte más baja de la pantalla se encuentra a 0,25 m del fondo de la estructura de metacrilato, permitiendo el paso del agua desde la zona con flujo descendente que opera como tapón hidráulico a la zona de volumen de decantación. La zona de volumen de decantación está limitada superiormente por el sistema de filtrado situado a 0,45 m del fondo de la estructura principal.

#### ***Sistema de filtrado.***

El sistema de filtrado se encuentra emplazado horizontalmente sobre el volumen de decantación. Este sistema cubre la superficie del volumen de decantación y tiene un largo variable entre 0,70 m y 1,10 m, dependiendo de la posición de la pantalla.

El sistema de filtrado descansa sobre unos soportes confeccionados con mallas metálicas que permiten el paso del flujo del agua. Estos soportes mantienen el sistema de filtrado a una altura constante de 0,45 m del fondo de la estructura de metacrilato (Figura 3.5).

La configuración del sistema de filtrado consiste en una o varias capas de geotextil con un sistema de lastre o sujeción que evita que el geotextil se mueva de su emplazamiento

Los objetivos del sistema de filtrado son retener los aceites y sedimentos que aún se encuentren en suspensión y ser un soporte que permita la aparición de una biopelícula de microorganismos biodegradadores de aceites y grasas. La

hipótesis que se aplica es que la biodegradación ocurre principalmente en la capa de geotextil, facilitando la depuración y la auto-limpieza del sistema.



Figura 3.5. Soporte del sistema de filtrado del SCPT

Durante la investigación se utilizaron diferentes sistemas de fijación o lastrado, condicionando el tipo de sistema de filtrado.

#### ***Sistema de filtrado tipo A.***

Este sistema está conformado por una o varias capas de geotextil y una capa de árido lavado de diámetro comprendido entre 4 y 12 mm, a modo de lastre (Figura 3.6).

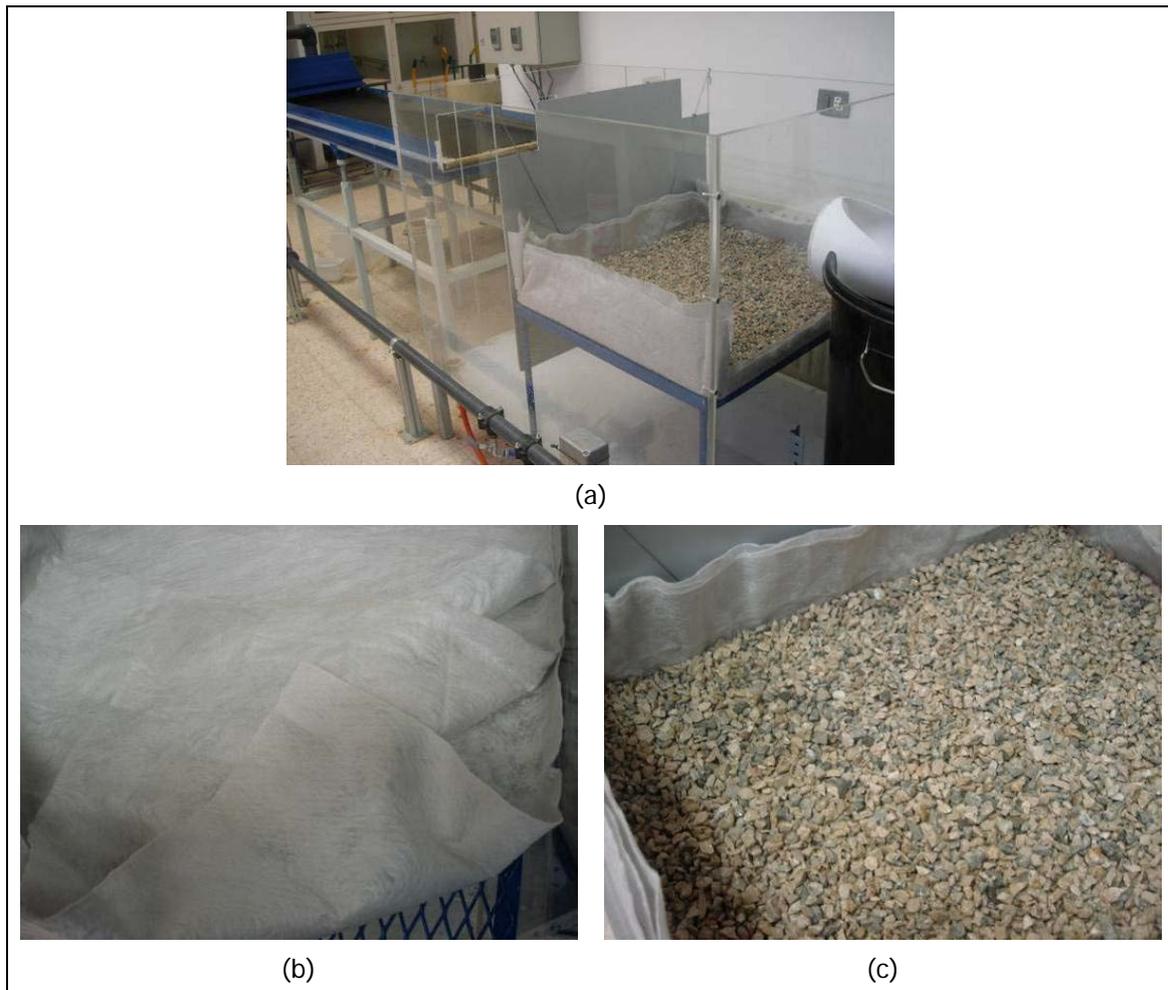


Figura 3.6. Sistema de filtrado tipo A del SCPT (a), compuesto por capas de geotextil (b) y una capa de árido (c).

#### ***Sistema de filtrado tipo B.***

Este sistema consiste en una capa de geotextil, con una malla de polietileno y un marco metálico para darle rigidez (Figura 3.7).

#### ***Sistema de filtrado tipo C.***

Es el sistema de filtrado tipo B al que se le agregan 4 barras de acero de 2,5 kg cada una, para aumentar el lastre y la estabilidad del geotextil (Figura 3.8).



Figura 3.7. Sistema de filtrado tipo B del SCPT.

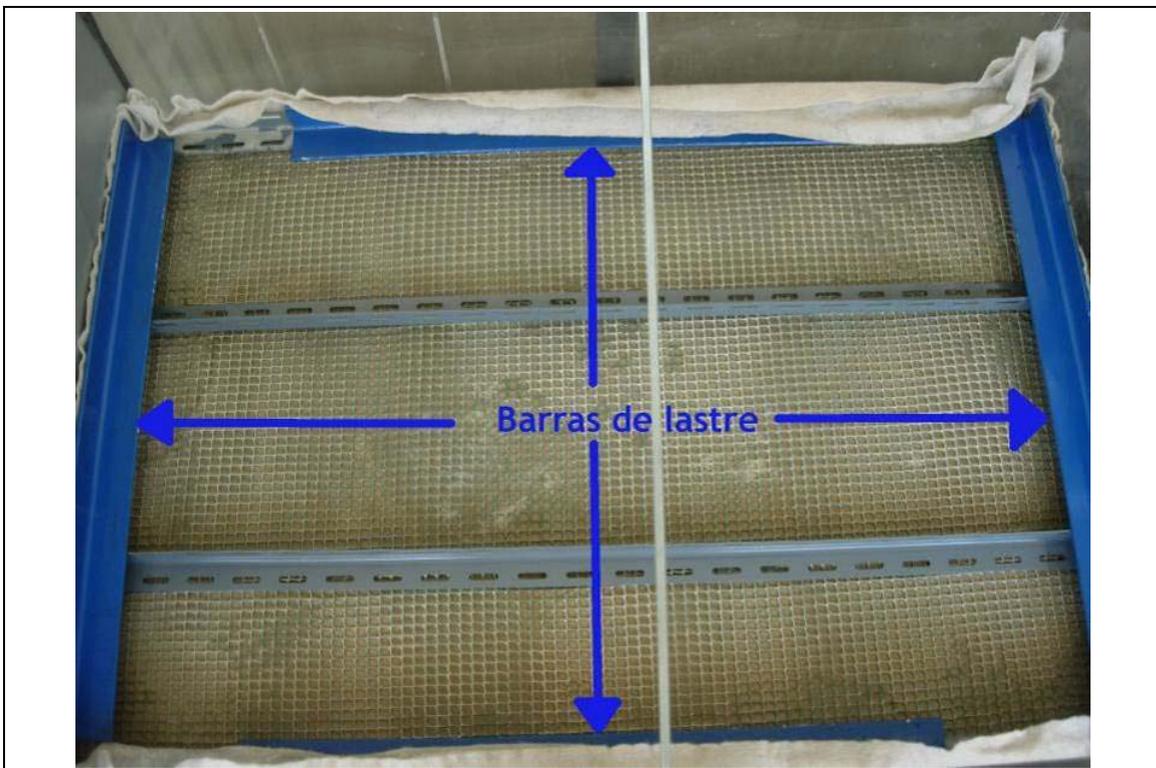


Figura 3.8. Sistema de filtrado tipo C del SCPT.

### 3.1.3 Elementos complementarios del SCPT.

Los elementos complementarios al SCPT son una rampa de aducción y un sistema de recirculación de agua. Estos elementos permiten simular el arrastre de contaminantes de la escorrentía superficial sobre una superficie impermeable (Figura 3.9).

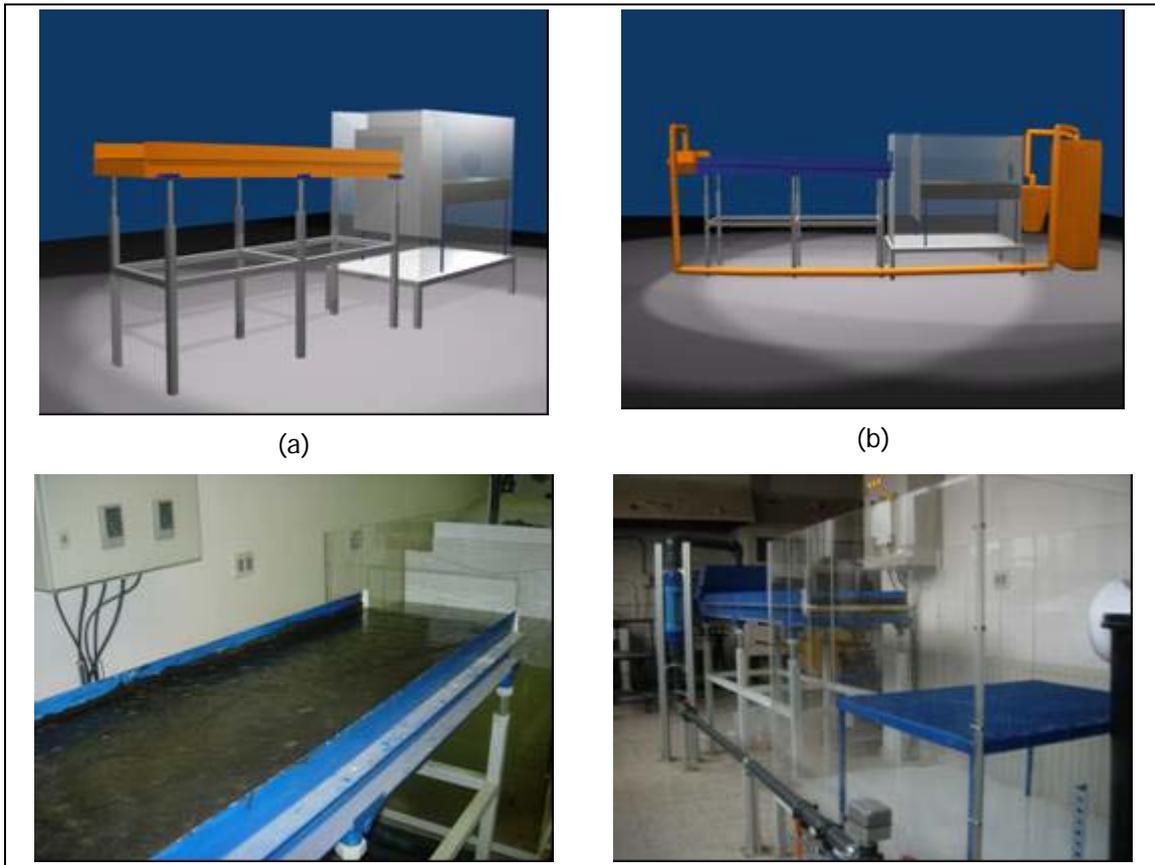


Figura 3.9. Rampa de aducción (a) y sistema de recirculación de agua (b).

#### ***Rampa de aducción.***

La rampa de aducción tiene un largo de 2,0 m por un ancho de 0,5 m. La pendiente de la rampa es ajustable fijándose para esta investigación una inclinación de 2 %, normalmente utilizada en carreteras y calles. La rampa cuenta con un soporte de malla que fue cubierto con betún con arena (*slurry* o lechada bituminosa), material impermeable sobre el que discurre la escorrentía, arrastrando los contaminantes depositados en su superficie.

### ***Sistema de recirculación de agua.***

El sistema de recirculación está conformado por dos bombas con caudal regulable entre 1,0 y 2,5 l/s, un tanque de acumulación de 1,0 m<sup>3</sup>, un contenedor de recogida de agua a la salida del prototipo del SCPT, y una cámara en la cabecera de la rampa de aducción para la generación de la lámina de escorrentía.

El sistema de recirculación comienza y termina en el tanque de acumulación. Una de las bombas toma agua desde el tanque de acumulación y la envía a la cámara en la cabecera de la rampa. La función de la cámara es asegurar que la lámina de agua tenga una altura homogénea al inicio de la rampa de aducción y transversalmente a lo largo de toda ella. A continuación el agua entra en el SCPT.

Una vez que el agua ha pasado por el SCPT, es recogida en el contenedor situado a la salida. Desde aquí es bombeada al tanque de acumulación por la segunda bomba, cerrando el circuito de recirculación. En esta segunda línea de bombeo se cuenta con un filtro externo adicional para capturar los contaminantes que aún pueden encontrarse en el agua, asegurando de esta forma que el agua se encuentre limpia durante el proceso de recirculación.

## **3.2 Fundamentos de los ensayos de laboratorio.**

### **3.2.1 Contaminantes utilizados en los ensayos.**

La eficiencia del SCPT fue determinada a través de la capacidad de retención de sólidos y de aceites. El uso de estos contaminantes se adoptó debido a que su presencia es representativa de la contaminación de la escorrentía superficial y está relacionada con la presencia de otros contaminantes (Huang et al. 2007).

La contaminación en los ensayos fue simulada aportando sólidos (caliza) con una granulometría preparada en laboratorio. Esta es semejante a la encontrada en el muestreo de varias calles de Cantabria, en el norte de España (Zafra Mejía y Temprano González 2005) y es la mostrada en la Figura 3.10.

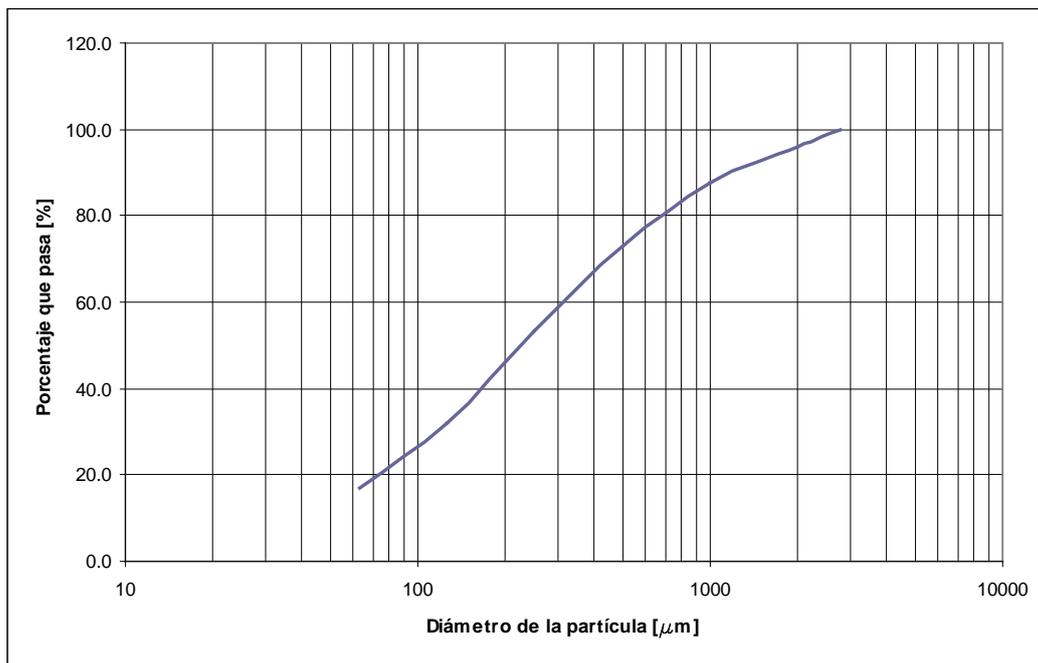


Figura 3.10. Granulometría de los sedimentos utilizados en los ensayo con el SCPT de laboratorio (Zafra Mejía y Temprano González 2005).

Por otra parte, la contaminación por aceite fue simulada con vertidos controlados de aceite usado de motor de automóvil, siguiendo el criterio empleado en investigaciones previas (Rodríguez Hernández 2008; Rodríguez Bayón 2008). Este aceite es similar al que utilizó Rodríguez Bayón (2008) y sus características se muestran en la Tabla 3.1.

Tabla 3.1. Características del aceite usado de motor de automóvil (Rodríguez Bayón 2008).

Banda	Porcentaje %
C5-C6	0,71
C6-C7	0,82
C8-C10	1,76
C10-C12	0,50
C12-C16	0,60
C16-C21	3,55
C21-C35	17,26
>C35	74,80
<b>Total</b>	<b>100,00</b>

Las cargas contaminantes presentes en el agua se determinaron mediante el método de concentración media del evento (*Event Mean Concentration, EMC*). Tal como se explicó en el punto 2.2, la EMC corresponde a la razón entre el total de la masa contaminante y el volumen total de agua, determinándose mediante la Ecuación 2.1 (Taebi y Droste 2004).

### 3.2.2 Procedimientos de análisis de calidad de aguas.

El tamaño de las partículas de sedimento en el efluente era menor a 80  $\mu\text{m}$ , por tanto, la determinación de la concentración de sólidos en el efluente se realizó mediante el método propuesto por American Public Health Association (American Public Health Association et al. 2005) para sólidos suspendidos (*Total Suspended Solids, TSS*).

En el caso de los aceites, la determinación de su concentración en las muestras se realizó mediante infrarrojos, según la norma U.S. EPA 600/4-79-020, complementada con las instrucciones de uso de la máquina HORIBA OCMA-310 utilizada en el estudio de las muestras y en investigaciones previas (Coupe et al. 2006; Rodríguez Bayón 2008).

#### ***Determinación de la concentración de TSS.***

Los materiales empleados para desarrollar el análisis de TSS se presentan en la Figura 3.11 y corresponden a:

- Rampa de filtración (Figura 3.10 a).
- Cápsulas de evaporación de porcelana (Figura 3.10 a).
- Filtros de fibra de vidrio con poros de  $47 \mu\text{m}$  (Figura 3.10 b).
- Desecador (Figura 3.10 c).
- Balanza de precisión 0,001g (Figura 3.10 d).
- Bomba de vacío (Figura 3.10 e).
- Botella acumuladora de agua (Figura 3.10 f).
- Estufa de secado.

➤ ***Procedimiento de medida.*** El procedimiento seguido para determinar la concentración de TSS en cada muestra de agua recogida fue la siguiente:

1. Depositar un filtro en una cápsula de evaporación de porcelana.
2. Dejar el filtro y la cápsula en la estufa de secado a  $103^{\circ}$ - $105^{\circ}\text{C}$  durante 20 minutos.
3. Enfriar el filtro y la cápsula en el desecador al menos 20 minutos.
4. Pesar el filtro y la cápsula en la balanza de precisión.
5. Depositar el filtro en la rampa de filtración.
6. Filtrar 500 ml de muestra de agua mediante vacío.
7. Repetir pasos 1, 2, 3 y 4.



Figura 3.11. Imágenes de los materiales empleados en los análisis de sólido suspendidos.

La concentración de TSS se calcula según la Ecuación 1.2

$$TSS = \frac{(A - B)}{V}$$

Ecuación 3.6

Donde:

- A :       Peso de filtro y cápsula después de filtrado en miligramos.
- B :       Peso de filtro y cápsula antes de filtrado en miligramos.
- V :       Volumen de agua filtrada de la muestra en litros.

***Determinación de la concentración de O&G en las muestras.***

➤ ***Descripción del funcionamiento del analizador HORIBA.*** El analizador del contenido de aceite en agua HORIBA OCMA-310 utiliza la espectroscopia infrarroja para determinar la cantidad de aceite en una muestra de agua.

La espectroscopia infrarroja se basa en el principio que señala que las distintas moléculas vibran en un determinado rango de longitud de onda. Si las moléculas son irradiadas con luz infrarroja, las moléculas producen un campo eléctrico oscilante que absorbe la parte de la radiación infrarroja con la misma frecuencia que dicho campo eléctrico producido. Como cada tipo de molécula tiene su propio rango de longitud de onda, cada tipo de molécula absorbe un único rango de radiación infrarroja.

El espectro infrarrojo absorbido por una molécula se muestra gráficamente. El gráfico muestra la frecuencia de la radiación absorbida y el porcentaje de luz que no es absorbida por la molécula (Gráfico 3.1 a). En consecuencia, midiendo la absorción de diferentes longitudes de onda, y la posición y fuerza de las bandas de absorción es posible hacer un análisis cualitativo y cuantitativo de las sustancias presentes en la muestra analizada.

El analizador HORIBA OCMA-310 utiliza el disolvente S-316 de HORIBA para extraer el aceite de la muestra de agua. Esta mezcla de disolvente y aceite es la que finalmente se analiza por espectrometría de infrarrojos. Una propiedad importante del disolvente utilizado es que tiene un rango de absorción de infrarrojos muy diferente del de los aceites, por lo que no produce alteraciones en el rango de absorción de estos últimos.

En el Gráfico 3.1 se muestran las frecuencias de radiación infrarroja absorbida por un aceite y por el disolvente S-316 empleado por el analizador HORIBA OCMA-310.

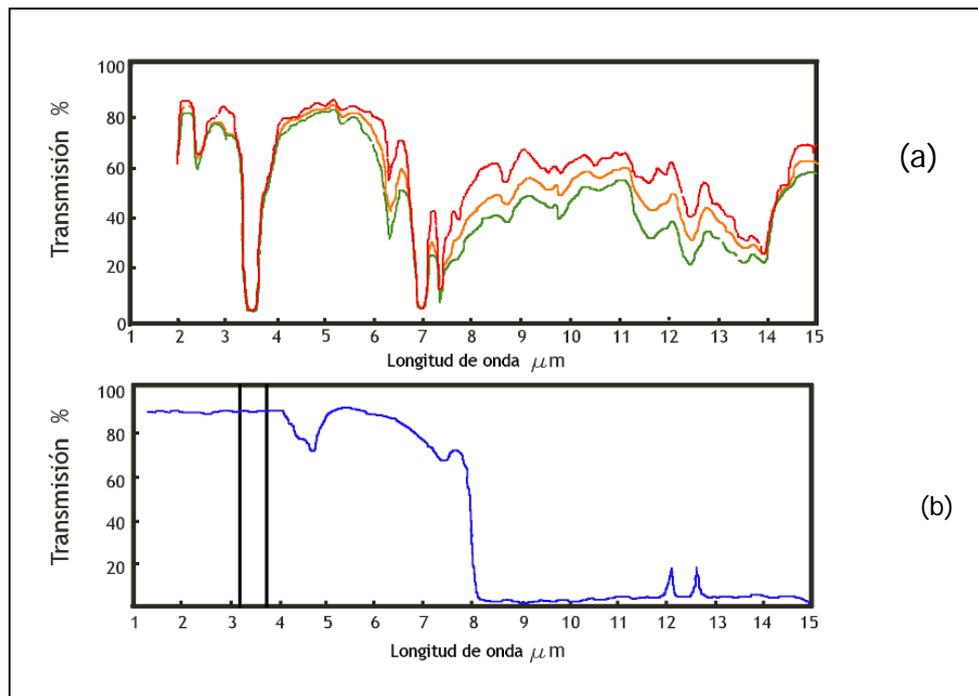


Gráfico 3.1. Frecuencias de radiación infrarroja absorbidas por el aceite (a) y el disolvente S-316 (b)

➤ **Materiales.** Los materiales complementarios empleados en el análisis de muestras de agua contaminadas con aceite se muestran en la Figura 3.12 y corresponden a:

- 2 vasos de precipitado de 100 ml.
- Jeringa de toma de muestra de 20 ml.
- Jeringa de toma de disolvente de 10 ml.
- Disolvente de extracción S-316.



Figura 3.12. Materiales complementarios empleados en el análisis de muestras de agua contaminada con aceites.

➤ **Calibración a cero del analizador.** Antes de analizar las muestras se calibra a cero el analizador. El procedimiento utilizado hace referencia a los elementos del analizador HORIBA mostrados en la Figura 3.13. Los pasos seguidos en la calibración son:

1. Encender el equipo y dejar estabilizar hasta que desaparezca la indicación luminosa de WARM UP.
2. Introducir 10 ml de disolvente S-316 puro en el analizador.
3. Abrir la válvula EXTRACT y esperar unos 30 segundos.
4. Pulsar el botón MEAS para realizar la medición.
5. Abrir la válvula DRAIN para evacuar el disolvente a un vaso precipitado.
6. Repetir los puntos 2, 3, 4 y 5 hasta obtener medidas repetitivas y entonces, después de pulsar MEAS, pulsar ZERO Cal.

➤ **Procedimiento de medida de O&G en una muestra.** Los elementos del analizador a que hace referencia el procedimiento se muestran en la Figura 3.13:

1. Introducir 20 ml de muestra y 10 ml de disolvente S-316 en el analizador.
2. Pulsar botón EXTRACT para mezclar la muestra con el disolvente durante 40 segundos.

3. Abrir válvula EXTRACT y esperar 15 segundos.
4. Pulsar botón MEAS para obtener la lectura de la medida y anotarla.
5. Abrir válvula DRAIN y recoger la muestra en un vaso precipitado.



Figura 3.13. Analizador de contenido de aceite en agua HORIBA OCMA-310.

### 3.2.3 Determinación de las variables respuesta.

Las variables respuesta que se pretenden estudiar con los ensayos en el prototipo del SCPT son:

- La concentración media del evento de sólidos en el efluente (*Event Mean Concentration, EMC<sub>S</sub>*).
- La eficiencia de depuración de sólidos ( $Ef_S$ ).
- La concentración media del evento de aceites en el efluente (*Event Mean Concentration, EMC<sub>A</sub>*).
- La eficiencia de depuración de aceites ( $Ef_A$ ).

Las concentraciones medias de los eventos de sólidos y aceites se determinan según la Ecuación 2.1, descrita en el punto 2.2.1. La eficiencia de depuración de sedimentos y la eficiencia de depuración de aceites se determina según las Ecuación 3.7 y Ecuación 3.8 descritas a continuación:

$$Ef_s = \frac{C.Sed}{EMC_s} * 100 \quad \text{Ecuación 3.7}$$

$$Ef_A = \frac{C.Ace}{EMC_A} * 100 \quad \text{Ecuación 3.8}$$

Donde:

- $Ef_s$  : Eficiencia de depuración de sólidos (%).  
 $C.Sed$  : Concentración media de sólidos del evento en el afluente (mg/l).  
 $EMC_s$  : Concentración media de sólidos del evento en el efluente (mg/l).  
 $Ef_A$  : Eficiencia de depuración de aceites (%).  
 $C.Ace$  : Concentración media de aceites del evento en el afluente (mg/l).  
 $EMC_A$  : Concentración media de aceites del evento en el efluente (mg/l).

#### 3.2.4 Procedimiento de análisis de la presencia de microorganismos.

Con el objetivo de demostrar la presencia de microorganismos en el geotextil del sistema de filtrado se procedió a la extracción de muestras, las que fueron procesadas en laboratorio mediante técnicas microbiológicas. El procedimiento adoptado consta de dos partes:

- Extracción de bacterias del geotextil.
- Aislamiento y determinación de la población de Bacterias Degradadoras de Hidrocarburos (BDH), presentes en las muestras.

### *Extracción de bacterias de las muestras de raspado de geotextiles.*

Las muestras del raspado de geotextiles se trataron como muestras de suelo para realizar la extracción de bacterias.

Los materiales utilizados fueron:

- Tubos con tapa rosca de 15 ml esterilizados (Figura 3.14 a).
- Agua destilada esterilizada.
- Micropipetas de 20  $\mu\text{m}$
- Vortex (Figura 3.14 b).

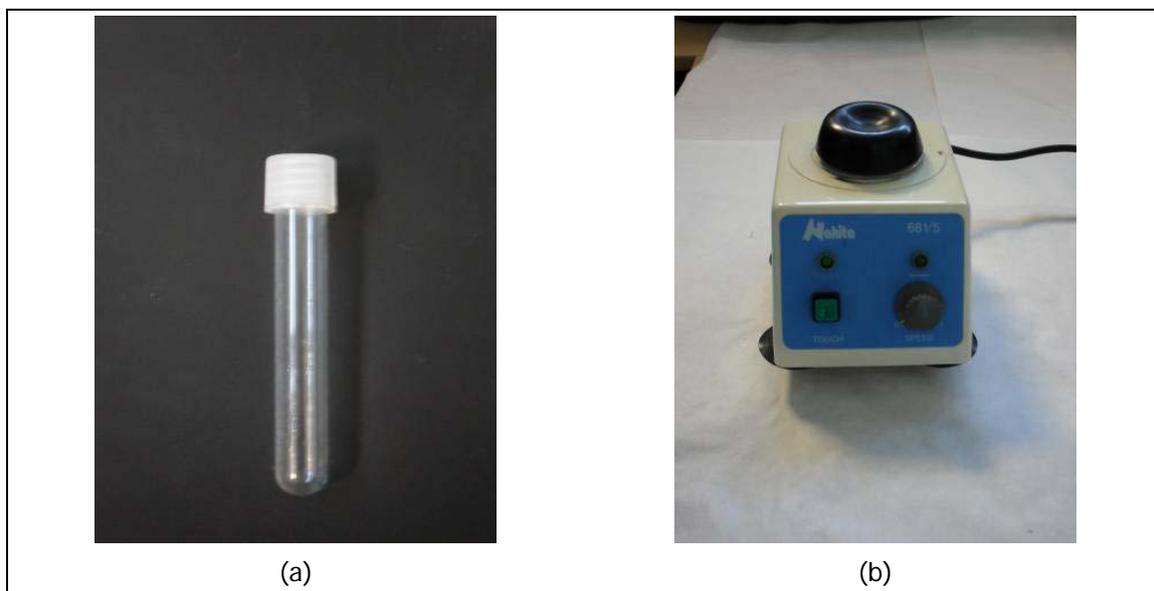


Figura 3.14. Tubos con tapa rosca (a) y Vortex (b) utilizados para la extracción de bacterias de las muestras de raspado de los geotextiles.

El procedimiento de extracción consiste en diluir la muestra en agua destilada esterilizada en una proporción de 1:10 ó 1:100, dependiendo de la cantidad de muestra extraída. Luego se procede a agitar enérgicamente la mezcla en un vortex durante 1 minuto, dejando un tiempo de reposo para permitir la precipitación de las partículas sólidas (Altamirano y Pozzo Ardizzi 2000; Johnsen et al. 2002; Massol 2009) (Figura 3.15).

De los sobrenadantes de la mezcla se extraen muestras líquidas con bacterias, que son utilizadas en los procedimientos de aislamiento y determinación de la población de bacterias degradadoras de hidrocarburos (BDH).



Figura 3.15. Mezcla de muestra de bacterias disuelta en agua destilada.

#### ***Aislamiento y determinación de población de Bacterias Degradadoras de Hidrocarburos (BDH).***

Una vez extraídas las bacterias de las muestras de geotextiles se procedió a determinar la población de BDH mediante el método del número más probable (*Most Probable Number*, MPN) (Wrenn y Venosa 1996; Altamirano y Pozzo Ardizzi 2000; Johnsen et al. 2002; Viñas Canals 2005; Efremenko et al. 2005; Rodríguez Bayón 2008).

Los elementos utilizados para este procedimiento fueron:

- Medio de cultivo Bushnell Hass (BH) esterilizado.
- Placas Microtiter estériles (Figura 3.16 a).
- Micropipetas de 20  $\mu\text{m}$  y puntas estériles (Figura 3.16 b).
- Micropitetas de 2  $\mu\text{m}$  y puntas estériles (Figura 3.16 b).
- Aceite usado de motor esterilizado (150°C por 4:00 hr)

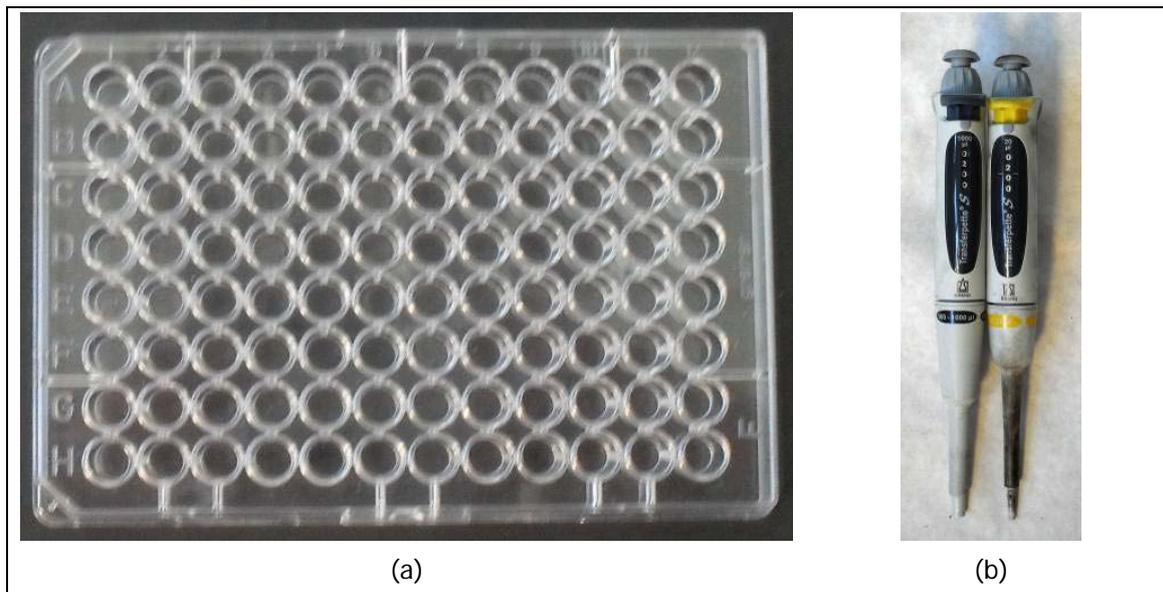


Figura 3.16. Microtiter (a) y micropipetas (b) utilizados en el aislamiento de bacterias degradadoras de hidrocarburos.

El procedimiento del método del MPN es el siguiente:

- Vertido de 200  $\mu\text{l}$ . de muestra en 5 réplicas en la primera fila del Microtiter.
- Vertido de 180  $\mu\text{l}$ . de cultivo BH en el resto de las filas del Microtiter.
- Extracción de 20  $\mu\text{l}$ . de muestra de la primera fila y vertido en la fila siguiente (dilución 10:1 de la muestra).
- Repetición del punto anterior para cada una de las filas del Microtiter, exceptuando la última fila.
- Vertido de 2  $\mu\text{l}$ . de aceite usado de motor en cada uno de los pocillos del Microtiter, como única fuente de carbono y energía (Altamirano y Pozzo Ardizzi 2000).
- Mantener las placas Microtiter en incubadora durante 14 días a 25°C.
- Determinar la densidad de bacterias contando el número de réplicas positivas en cada una de las filas del Microtiter (ver Figura 3.17).

Una vez establecida la cantidad de réplicas positivas se calcula el número de bacterias de una muestra patrón. Este cálculo se realizó mediante el programa informático MNP Calculator, Built 23.

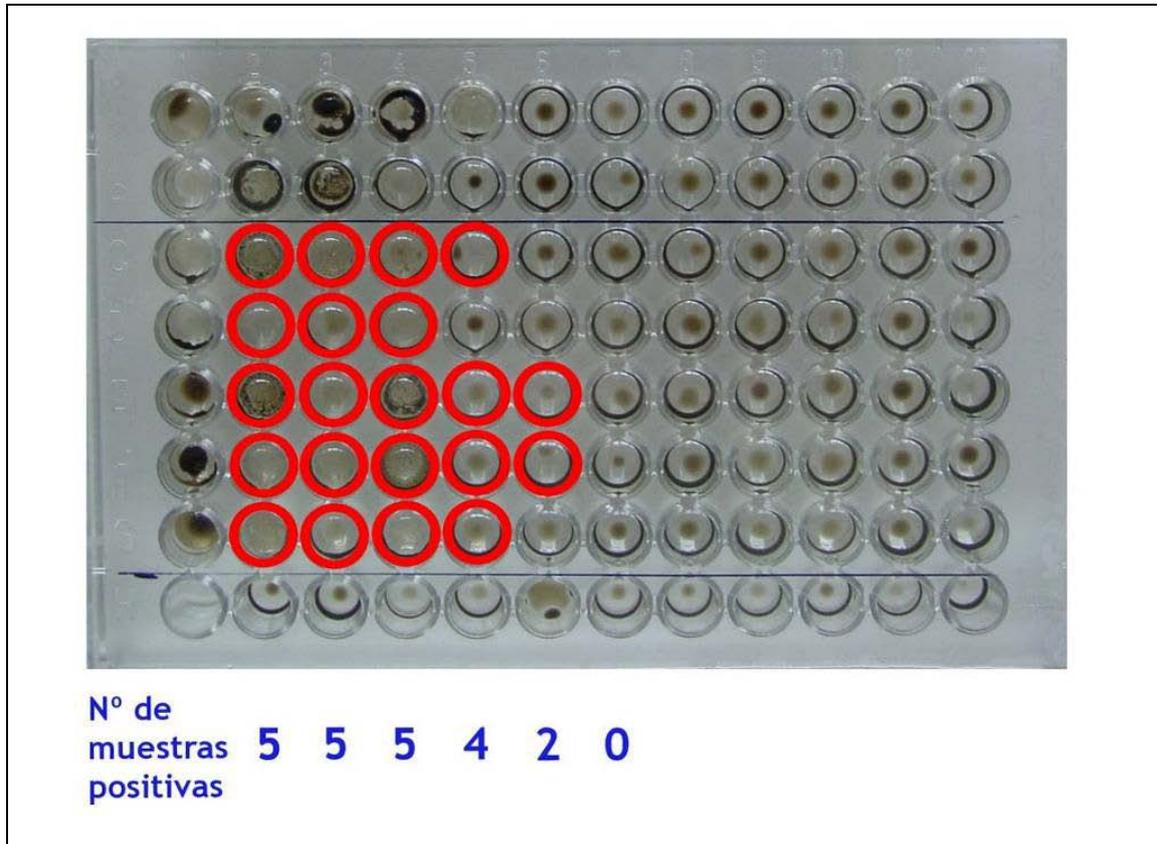


Figura 3.17. Determinación de réplicas positivas del método del número más probable (Most Probable Number, MPN).

Finalmente, la densidad de bacterias en la muestra se determina según la Ecuación 3.9.

$$D = VT * \left[ \frac{1}{FD} \right] * \left[ \frac{VolT}{VolI} \right] \quad \text{Ecuación 3.9}$$

Donde:

- D : Densidad de bacterias (nº/ml).
- VT : Valor de muestra patrón obtenido del programa informático.
- FD : Factor de dilución.
- VoIT : Volumen de muestra patrón ( $\mu$ l).
- Voll : Volumen de incubación ( $\mu$ l).

### 3.3 Ensayo 0: Conductividad hidráulica de los geotextiles.

Como paso previo a los ensayos realizados con el SCPT se presenta el ensayo de caracterización hidráulica del geotextil de filtro.

En el ensayo se utilizaron tres probetas dobles de geotextil; es decir, cada probeta consistía en dos capas de geotextil, de forma circular con un diámetro de 55 mm cada una (Figura 3.18).

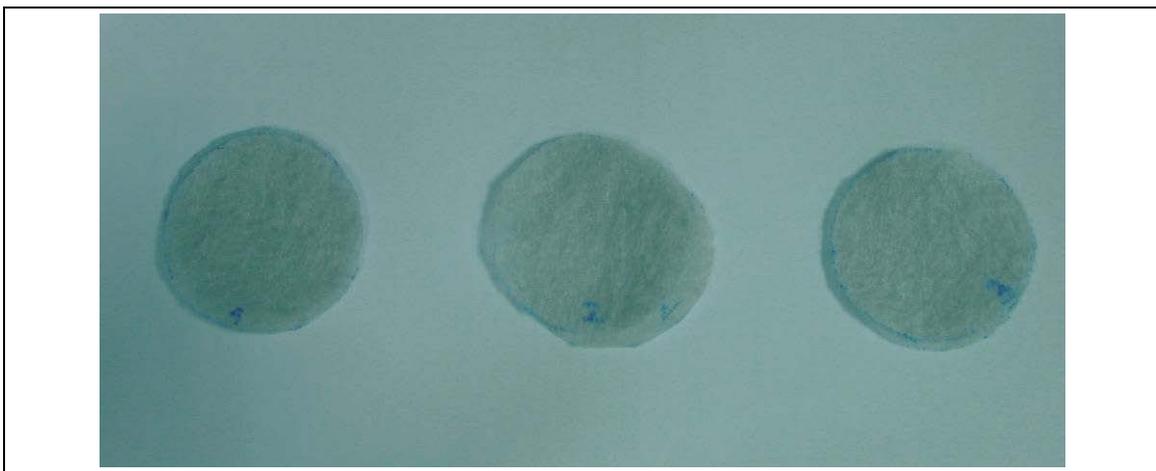


Figura 3.18. Probetas de geotextil a emplear en el Ensayo 0.

Las probetas fueron ensayadas con el equipo de análisis de flujo perpendicular a las fibras del geotextil del Laboratorio de Geosintéticos de la Universidad de Cantabria (LAGUC) (Figura 3.19).

El ensayo fue diseñado especialmente para esta investigación, partiendo de las pautas generales de la norma UNE-EN ISO 11058:1999. Cada probeta fue ensayada 3 veces, con un tiempo entre ensayos de 1 día. El ensayo se daba por concluido cuando el caudal que pasaba por el geotextil se estabilizaba para una altura de carga hidráulica de 70 mm.

El procedimiento completo del ensayo consiste en:

- Colocar la probeta en la máquina de ensayos (Figura 3.20).
- Iniciar el flujo de agua.
- Esperar a que la diferencia de nivel de agua antes y después de la probeta sea igual a 70 mm.
- Mantener los 70 mm de desnivel hasta que el caudal de paso se estabilice.



Figura 3.19. Equipo de análisis de flujo perpendicular a las fibras de geotextil (LAGUC) empleado en el Ensayo 0.

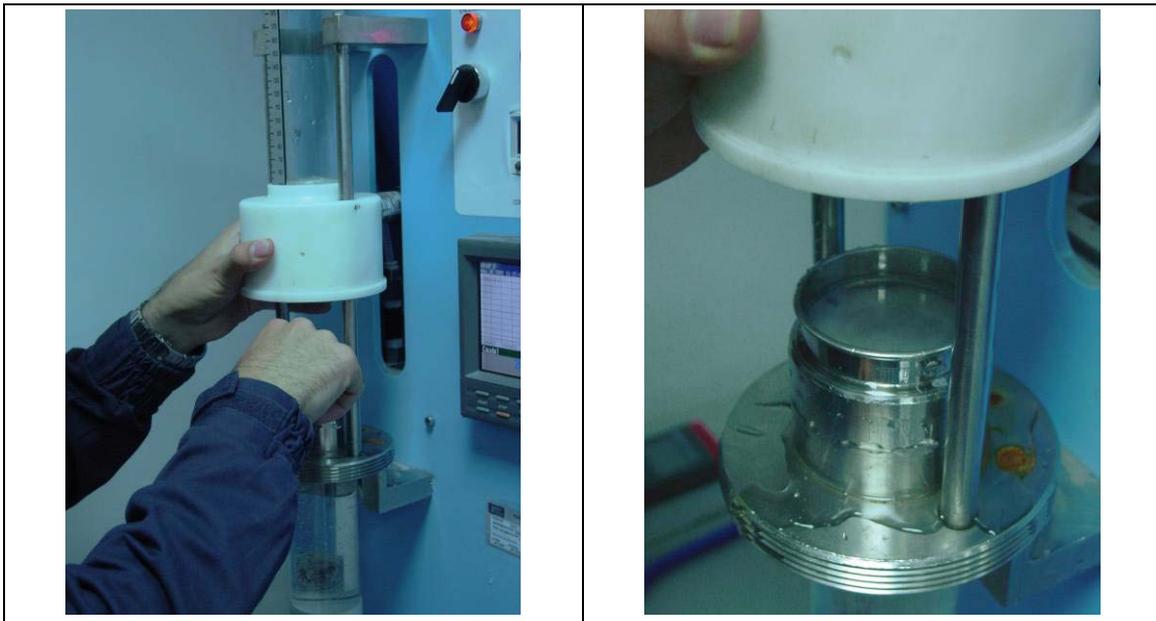


Figura 3.20. Colocación de la probeta en la máquina de ensayos.

### 3.4 Ensayo 1: Determinación de la eficiencia de depuración de partida del SCPT.

Este primer ensayo con el SCPT tiene como finalidad obtener información sobre el comportamiento del prototipo bajo diferentes configuraciones de operación inicial y totalmente limpio, analizando cuáles de los factores considerados tienen influencia significativa en la eficiencia de depuración del SCPT y cuantificando la importancia de dicha influencia.

Los factores estudiados fueron:

1. Caudal afluente.
2. Carga contaminante: sólidos y aceites
3. Configuración del SCPT.

La configuración del SCPT depende de la posición de la pantalla; por tanto, de la longitud del sistema de filtrado, y del número de capas de geotextil utilizadas en el sistema de filtrado.

Los ensayos siguieron una aproximación secuencial hacia las condiciones óptimas. La serie de ensayos se ajustó a un diseño factorial de experimentos del tipo  $2_{IV}^{5-1}$  más dos puntos centrales, dando un total de dieciocho ensayos (Box et al. 2005). Los factores específicos y su rango de variación se muestran en la Tabla 3.2.

Tabla 3.2. Factores considerados en el Ensayo 1 del SCPT y sus rangos de variación

Variable	Rango		
	Unidad	mín.	Máx.
Caudal entrada	l/s	1,0	2,5
Sedimentos	mg/l	100	300
Aceites	mg/l	10	30
Largo del filtro	cm	70	110
Capas de geotextil	nº	1	3

El procedimiento del Ensayo 1 es:

1. Lavado del SCPT.
2. Puesta a punto de la configuración del SCPT correspondiente.
3. Calibración del caudal afluente correspondiente.
4. Vaciado del interior del SCPT.
5. Vertido del sólidos en la rampa de aducción (Figura 3.21 a).
6. Vertido del aceite en la rampa de aducción (Figura 3.21 b).
7. Circulación del caudal afluente durante veinte minutos (Figura 3.21 c y d).
8. Toma de muestras del efluente cada cuatro minutos.
9. Vaciado del SCPT.

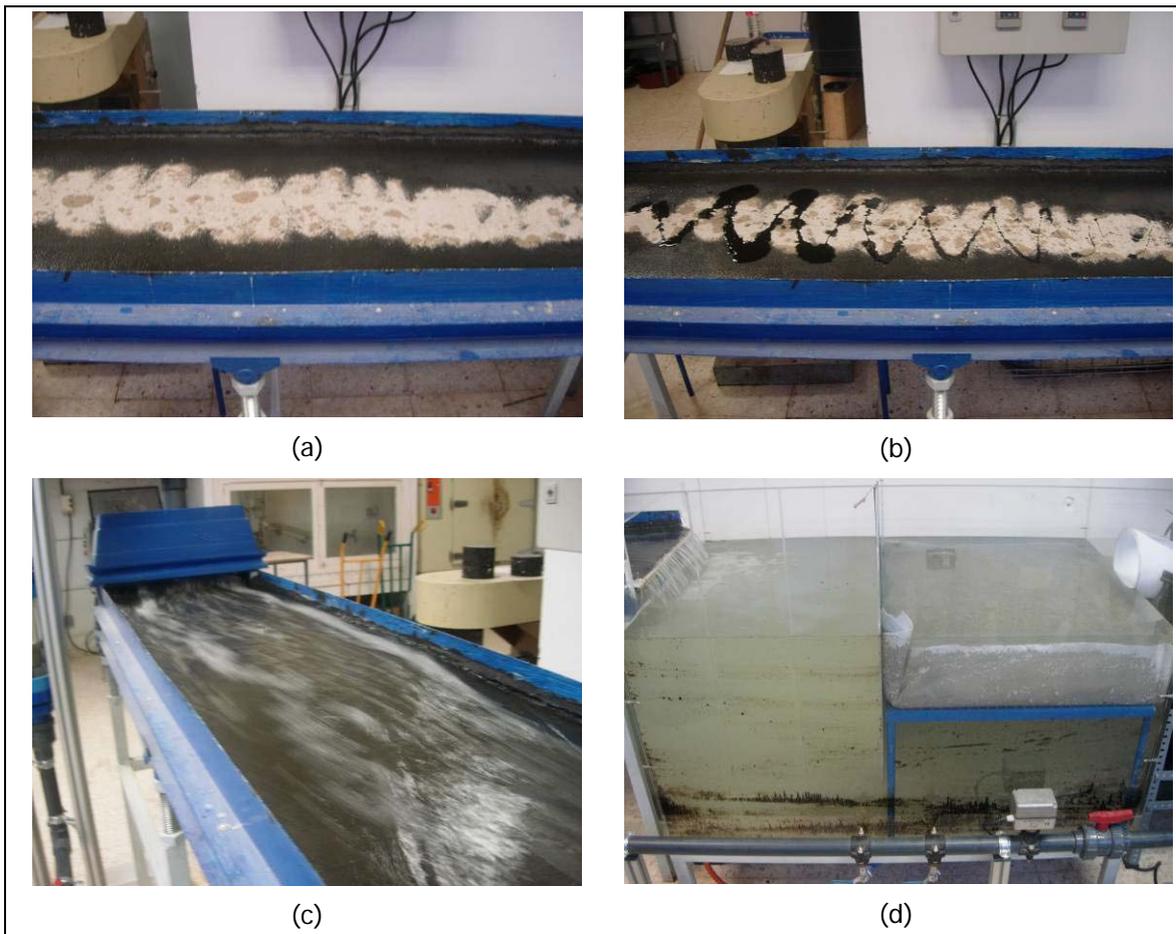


Figura 3.21. Pasos del Ensayo 1: Vertido de sólidos (a) y aceites (b), circulación de agua (c) y comportamiento del SCPT (d).

### 3.5 Ensayo 2: Determinación de la eficiencia de depuración a largo plazo del SCPT con carga alta de contaminantes.

Esta etapa tiene como objetivo comprobar el funcionamiento a largo plazo del SCPT; es decir, observar la respuesta del sistema ante un uso continuado sin que se retiren los contaminantes de su interior, o se limpiara el SCPT. Las cargas contaminantes utilizadas en este ensayo corresponden a 200 mg/l de sólidos y a 20 mg/l de aceites

En esta etapa se utiliza una única configuración de SCPT. Esta configuración corresponde a la que en la etapa anterior obtenía la mayor eficiencia de depuración de ambos contaminantes en forma simultánea. Así mismo, se toma

como hipótesis que un largo de filtro mayor permite un mayor tiempo de uso del mismo antes de colmatarse.

En consecuencia, el SCPT se ensayó inicialmente con un sistema de filtrado tipo B de 110 cm de largo de filtro y de 2 capas de geotextil (Figura 3.22).



Figura 3.22. Configuración de SCPT adoptada para la etapa de largo plazo Ensayo 2.

Posteriormente, durante el desarrollo de esta etapa de ensayo se cambió la configuración del sistema de filtrado al tipo C (puntos 3.1.2 y 4.3), con el objeto de hacer frente a la mayor resistencia del filtro al paso del agua a medida que se iba colmatando.

Tal como se dijo en el punto 2.5, uno de los principales problemas de los sistemas de decantación y separación de aceites es la resuspensión de los contaminantes. Este fenómeno se produce especialmente cuando el sistema se ha secado o tiene un nivel de agua bajo en su interior y entra un caudal afluente importante. Esta situación, por tanto, es la situación más desfavorable de operación del SCPT a largo plazo. Para simular esta condición se vació lentamente el SCPT después de cada evento, dejando un nivel remanente de agua de 8 cm, lo que permitió asegurar que no se eliminara la capa de aceite que flotaba sobre la superficie del agua (Figura 3.23).

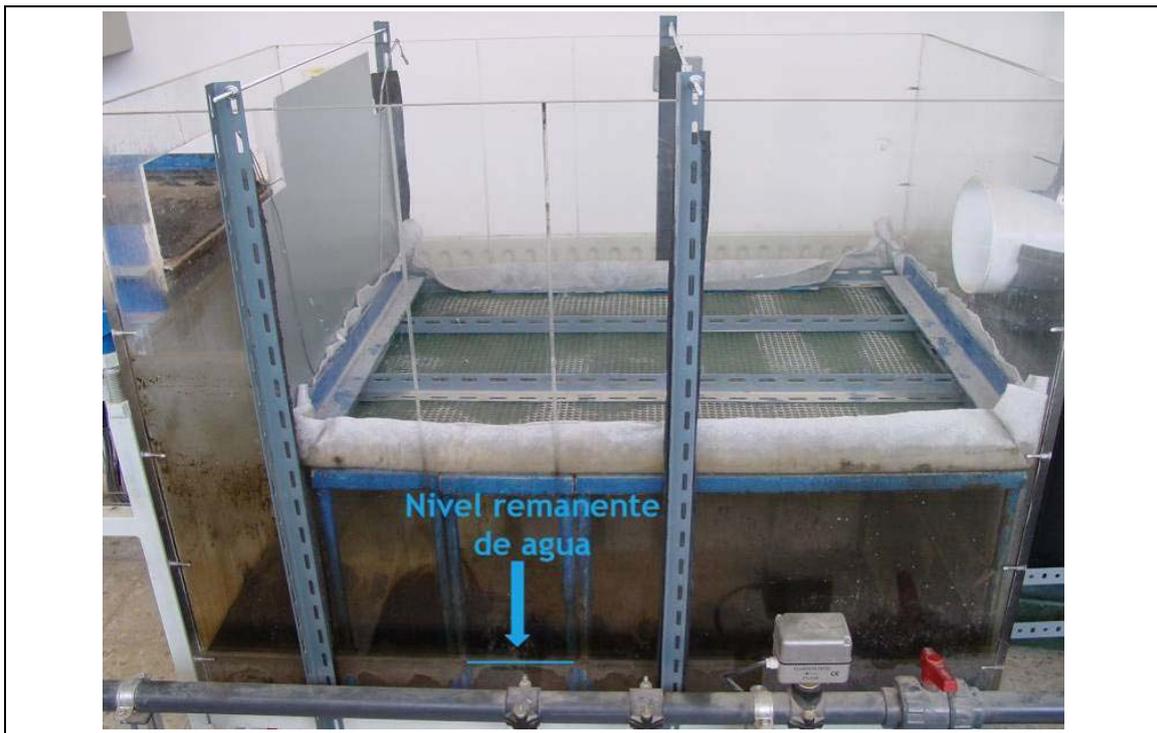


Figura 3.23. Nivel remanente de agua que evita la pérdida de aceites del interior del SCPT entre eventos del Ensayo 2.

Como parte del estudio del comportamiento del SCPT a largo plazo se estudió el efecto de cambiar el geotextil del sistema de filtrado luego de un tiempo de operación. El cambio de geotextil se produce cuando que el sistema de filtrado se ha desplazado. El resto del SCPT no es alterado, quedando dentro de él los contaminantes retenidos en los eventos simulados hasta ese momento.

El procedimiento general para cada evento del Ensayo 2 es:

1. Vertido de sólidos en la rampa de aducción.
2. Vertido del aceite en la rampa de aducción.
3. Circulación de agua mediante el sistema de bombeo para el ensayo durante veinte minutos.
4. Espera de diez minutos para permitir la decantación de los sólidos en suspensión.
5. Vaciado parcial del SCPT.

Toma de muestras: en un principio estaba establecida cada diez eventos de recirculación y vaciado, pero esta frecuencia fue modificada a cada cinco eventos como consecuencia de las respuestas del sistema de filtrado a la colmatación.

### **3.6 Ensayo 3: Determinación de la eficiencia de depuración a largo plazo del SCPT con carga media de contaminantes.**

El ensayo desarrollado en este punto es complementario al Ensayo 2. En este caso se estudia el comportamiento de las respuestas del SCPT en el largo plazo con una carga contaminante menor. La carga contaminante utilizada es la mitad del Ensayo 2; esto es, 100 mg/l de sólidos y 10 mg/l de aceites.

El procedimiento de ensayo es el mismo del Ensayo 2, salvo el vertido menor de contaminantes. En consecuencia el procedimiento del Ensayo 3 es:

1. Vertido de sólidos en la rampa de aducción.
2. Vertido del aceite en la rampa de aducción.
3. Circulación de agua mediante el sistema de bombeo para el ensayo durante veinte minutos.
4. Espera de diez minutos para permitir la decantación de los sólidos en suspensión.
5. Vaciado parcial del SCPT.

La toma de muestras para este ensayo se estableció cada cinco eventos como consecuencia de las respuesta del sistema de filtrado a la colmatación detectados en el Ensayo 2.

### **3.7 Ensayo 4: Evaluación de la actividad microbiana en el SCPT.**

Este ensayo tiene como finalidad el constatar el crecimiento de colonias de microorganismos, o biopelícula, en el geotextil que forma parte del sistema de filtrado del SCPT.

La presencia de colonias de microorganismos en el geotextil favorece la degradación de los hidrocarburos atrapados en el geotextil (Rodríguez Bayón 2008). De esta forma, se intenta determinar si el SCPT propuesto incluye o no un tratamiento biológico a largo plazo.

La extracción de muestras desde el geotextil se realizó mediante raspado y corte de fibras de geotextil con un escalpelo esterilizado. Las Zonas de Extracción de Muestras (ZEM) fueron determinadas mediante el método de muestreo aleatorio (Alba Fernández y Ruiz Fuentes 2006).

El procedimiento para escoger las ZEM consistió en dividir el área del geotextil perpendicular al flujo de agua, en celdas de 10 cm por 10 cm. De esta área se eliminó la franja perimetral de 10 cm de ancho, con la intención de disminuir la influencia de un posible efecto de borde en el sistema de filtrado. (Figura 3.24)

Con este procedimiento el área de estudio del geotextil quedó dividida en 54 celdas. Desconociéndose el valor medio y la desviación estándar de la población a estudiar, se estimó que un número de ZEM de catorce (correspondiente al 26% del área de estudio) permitiría asegurar un número de muestras representativas.

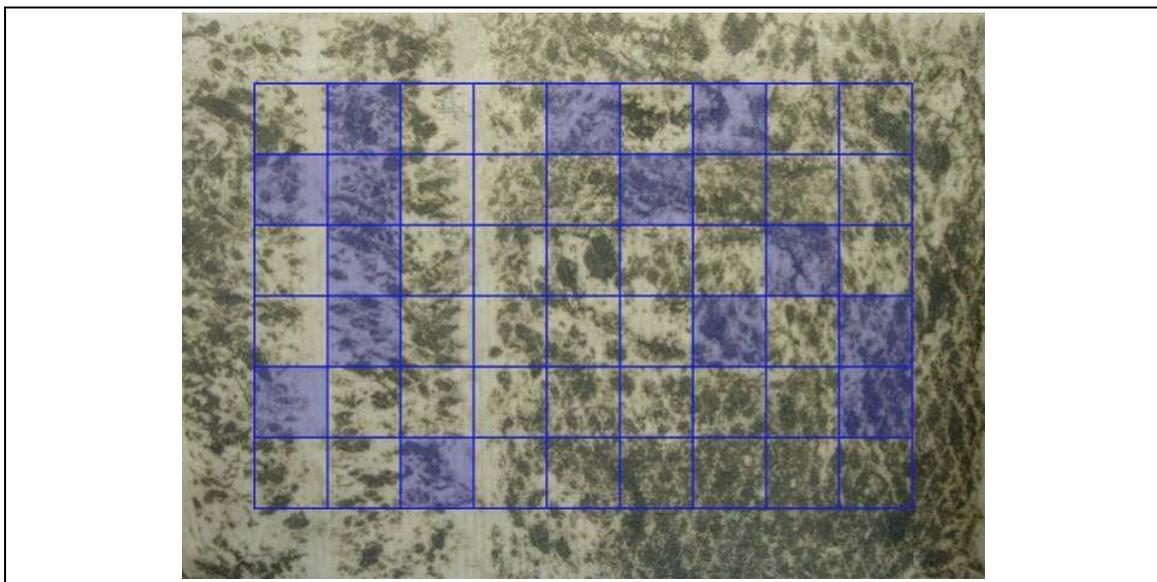


Figura 3.24. División del área de estudio y zonas de extracción de muestras de geotextil para el Ensayo 4.

Como el sistema de muestreo es sin reposición se procedió a dividir cada ZEM en 8 celdas, extrayéndose muestra una sola vez de cada una de ellas. Para evitar cualquier sesgo en la toma de muestras, el orden de raspado de la celda a utilizar para la extracción también fue realizado en forma aleatoria. La Figura 3.25 muestra un ejemplo.

Una vez extraídas las muestras, la presencia de colonias de microorganismos se determinó mediante el método del número más probable (MPN) y por cultivo en medio selectivo, explicadas previamente (ver punto 3.2.4).

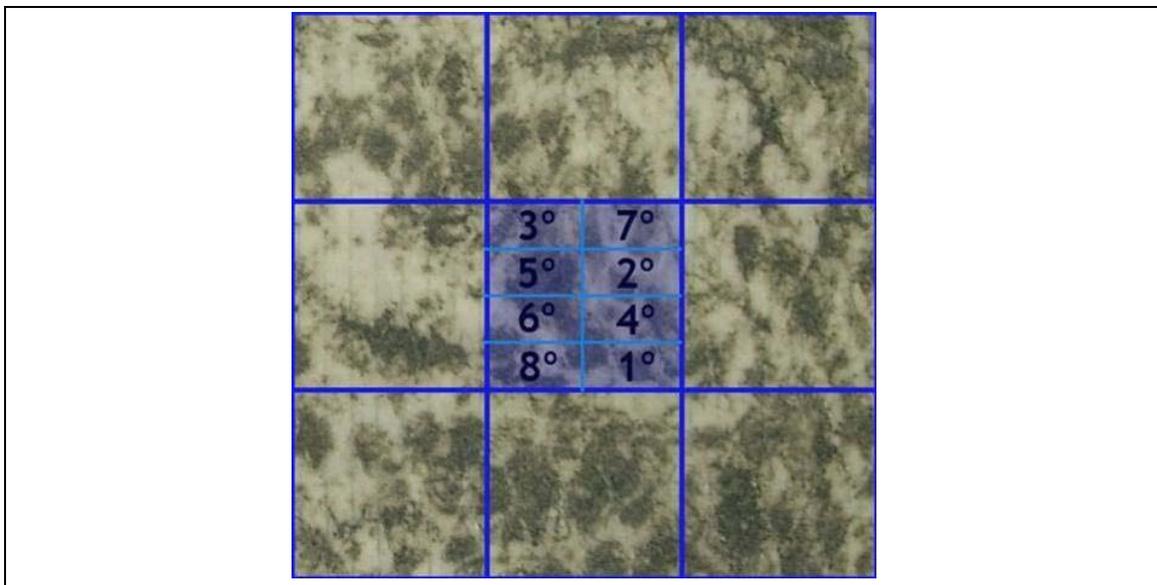


Figura 3.25. División de las zonas de extracción de muestra y orden de extracción de muestras.

## 4 ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS.

En este capítulo se presenta el tratamiento de los resultados de las muestras de los ensayos realizados en laboratorio. A los datos se les aplicó el análisis de regresión lineal múltiple, lo que incluye la comprobación del cumplimiento de los supuestos necesarios (Anexo III).

### 4.1 Resultados del Ensayo 0.

#### 4.1.1 Análisis descriptivo e inferencial de la conductividad hidráulica de los geotextiles.

En este ensayo se probaron tres tipos de geotextiles: Amopave<sup>®</sup>, Hanson Formpave Inbitex<sup>®</sup> y Polyfelt<sup>®</sup> TS 30. Estos geotextiles fueron elegidos por su capacidad para albergar una biopelícula de microorganismos degradadores de hidrocarburos (Rodríguez Bayón 2008). Las características principales de cada uno de estos geotextiles se presentan en la Tabla 4.1, una descripción más detallada se presenta en el Anexo II.

Tabla 4.1. Características de los geotextiles empleados en el Ensayo 0 (PROPEX Fabrics 2004; Hanson Formpave ; Polyfelt Gruppe 2005)

	Unidad	Amopave <sup>®</sup>	Hanson Formpave Inbitex <sup>®</sup>	Polyfelt <sup>®</sup> TS 30
<b>Características</b>				
<b>Mecánicas</b>				
Resistencia al punzonamiento CBR (ISO 12236)	N	-	1575	1750
Resistencia a la tracción alargamiento en rotura (ISO 10319)	kN/m	8,00	8,50	11,50

(Continúa en página siguiente)

Tabla 4.1. Características de los geotextiles empleados en el Ensayo 0 (continuación).

	Unidad	Amopave®	Hanson Formpave Inbitex®	Polyfelt® TS 30
<b>Características</b>				
<b>Hidráulicas</b>				
Abertura de poros (ISO 12956)	mm	100	-	100
Permeabilidad vertical (ISO 11058) ( $\Delta h=50\text{mm}$ )	$\mu\text{m/s}$	90	80	100
<b>Características</b>				
<b>Físicas</b>				
Espesor (ISO 9863)	mm	1,0	-	1,2
Masa por unidad de área (EN 965)	$\text{g/m}^2$	120	130	155 (EN ISO 9854)

Los resultados de los caudales obtenidos para cada uno de los geotextiles se presentan en la Tabla 4.2. En ella se aprecia que el geotextil Polyfelt® TS 30 es el que tiene los caudales mayores, con valores por encima de 2,0 l/min a excepción de un punto, llegando en varios casos a caudales sobre 4,0 l/min. El geotextil que presenta menores caudales finales es el Hanson Formpave Inbitex® que presenta una gran cantidad de valores por debajo de 2,5 l/min. En el caso de Amopave® los valores se reparten en forma homogénea en el rango 1,0 a 4,0 l/min.

Ordenando los geotextiles en orden ascendente según lo señalado en el párrafo anterior resultan: Hanson Formpave Inbitex®, Amopave® y Polyfelt® TS 30. Este orden concuerda con lo esperado según la permeabilidad vertical de cada uno de los geotextiles (Tabla 4.1).

Tabla 4.2. Resultados del Ensayo 0 para diferentes geotextiles.

Geotextil	Evento	Caudales por probeta (l/min)				
		1	2	3	4	5
Amopave®	E1	2,18	3,12	1,97	3,40	3,43
	E2	2,31	1,62	3,39	2,64	3,15
	E3	3,76	4,08	4,10	3,09	4,08
	E4	3,85	2,30	1,15	2,78	2,64
	E5	2,75	3,44	1,46	3,15	1,50
Invitex®	E1	2,35	1,66	4,08	2,55	1,23
	E2	1,86	1,14	1,99	1,49	3,62
	E3	2,21	1,40	2,22	2,21	3,38
	E4	3,59	1,55	3,12	3,30	1,70
	E5	3,53	1,98	2,14	2,46	1,89
Polyfelt® TS 30	E1	4,10	4,07	3,10	4,10	3,88
	E2	4,00	3,59	1,33	2,40	2,98
	E3	4,08	4,08	4,10	4,08	3,09
	E4	4,10	4,08	2,98	3,86	3,06
	E5	3,30	3,65	3,78	3,70	2,51

Mediante la prueba Kolmogorov-Smirnov se determinó que los caudales finales tienen un comportamiento normal ( $p$ -valor  $> 0.05$ ). A continuación se realizó un ANOVA para determinar si existe un comportamiento diferente según el número de evento o el tipo de geotextil.

En el caso del número de evento no se encontró diferencia entre ellos. En cambio, se determinó que en el caso del tipo de geotextil sí se producen diferencias ( $p$ -valor  $< 0.05$ ). Los subconjuntos que se forman se presentan en la Tabla 4.3.

Tabla 4.3. Subconjuntos homogéneos y valores de medias del caudal según tipo de geotextil en el Ensayo 0.

Geotextil	Subconjunto	
	1	2
Invitex®	2,34	
Amopave®	2,85	
Polyfelt® TS 30		3,52

#### 4.1.2 Discusión de los resultados de la conductividad hidráulica de los geotextiles.

El Polyfelt® TS 30, desde el punto de vista de la conductividad hidráulica, se diferencia del resto de los geotextiles estudiados y es el que presenta la mayor permeabilidad con el paso de los eventos. Además de poder albergar una biopelícula, una condición para utilizar un geotextil en el sistema de captación, pre-tratamiento y tratamiento (SCPT) es que presente una baja resistencia al paso del agua. Por tanto, de los geotextiles estudiados el Polyfelt® TS 30 es el que cumple mejor esta condición.

Así mismo, coincide que entre los geotextiles estudiados el que presenta un mayor crecimiento ante distintas condiciones del nivel de agua en pavimentos permeables es el Polyfelt® TS 30 (Rodríguez Bayón 2008). Por tanto, es este último geotextil el que será utilizado en los ensayos del prototipo SCPT de aguas de escorrentía superficial propuestos.

Por otra parte, se estudió si la presencia de aire retenido en la probeta al inicio del ensayo tenía influencia sobre el caudal. Para ello se apuntaron las probetas que presentaban burbujas de aire durante el ensayo y con los resultados se realizó la Prueba T, probando que sí existe una diferencia significativa debida a este factor.

Luego se analizó si esta diferencia se daba en todos los geotextiles estudiados y se determinó que en el caso del Hanson Formpave Inbitex® y del Polyfelt® TS 30 sí ocurría esta diferenciación, pero no así en el caso del Amopave®.

En todos los casos, tanto en el análisis general como en el realizado por tipo de geotextil, se estableció que el caudal es mayor cuando no hay aire retenido en el geotextil. Luego, se concluye que la presencia de aire en el geotextil disminuye la conductividad hidráulica del mismo, situación que debe tenerse en cuenta en los siguientes ensayos, principalmente en los estudios del funcionamiento a largo plazo de cualquier sistema basado en el empleo de geotextiles con el SCPT.

## 4.2 Resultados del Ensayo 1.

### 4.2.1 Análisis descriptivo de los resultados del Ensayo 1.

En la Tabla 4.4 se presentan los valores adoptados del caudal afluente (Q), el número de capas de geotextil en el sistema de filtro (C.Fil), el largo del sistema de filtrado (L.Fil) y las concentraciones medias del evento (*Event Mean Concentration*, EMC) en el afluente de sólidos (C.Sed) y aceites (C.Ace) correspondientes a las condiciones de operación del SCPT.

Así mismo, en la Tabla 4.4 se presentan los valores de concentración media de evento en el efluente de sólidos (EMC<sub>S</sub>) y aceites (EMC<sub>A</sub>) y la eficiencia de depuración para ambos contaminantes (Ef<sub>S</sub> y Ef<sub>A</sub>).

Tabla 4.4. Configuración del SCPT, concentraciones en el efluente y eficiencia de depuración obtenidos en el Ensayo 1.

Volumen Total (m <sup>3</sup> )	Q (m <sup>3</sup> /hr)	C.Fil	L.Fil (cm)	Afluente		Efluente		Ef <sub>S</sub>	Ef <sub>A</sub>
				C. Sed (mg/l)	C. Ace (mg/l)	EMC <sub>S</sub>	EMC <sub>A</sub>		
1,20	3,6	1	70	100	30	17,2	0,7	83,6	97,7
2,83	8,5	1	70	100	10	18,5	0,4	83,9	96,3
1,20	3,6	3	70	100	10	6,3	0,5	94,0	94,9
2,83	8,5	3	70	100	30	19,4	0,5	83,2	98,3
1,20	3,6	1	110	100	10	18,1	0,4	82,5	96,4
2,83	8,5	1	110	100	30	23,2	0,2	80,7	99,4
1,20	3,6	3	110	100	30	16,7	0,5	84,4	98,3
2,83	8,5	3	110	100	10	11,8	0,3	89,1	96,7
1,20	3,6	1	70	300	10	35,6	0,4	89,0	96,0
2,83	8,5	1	70	300	30	70,2	0,3	80,1	98,9
1,20	3,6	3	70	300	30	33,3	0,7	90,3	97,8
2,83	8,5	3	70	300	10	42,5	0,0	87,2	99,9
1,20	3,6	1	110	300	30	42,3	0,7	86,6	97,7
2,83	8,5	1	110	300	10	66,2	0,3	81,2	96,8
1,20	3,6	3	110	300	10	39,2	0,6	87,7	94,1
2,83	8,5	3	110	300	30	40,6	0,5	87,6	98,2
2,02	6,05	2	90	200	20	32,3	0,2	85,3	99,2
2,02	6,05	2	90	200	20	30,0	0,5	86,2	97,4
Media								85,7	97,4

Las eficiencias de depuración del SCPT alcanzan una media de 85 % para los sólidos y de un 97 % para los aceites. Una eficiencia de depuración de sólidos de un 85 % permite que la carga contaminante disminuya a valores inferiores a los máximos permitidos, según las normas europea (Directiva 2000/60/CE del

Parlamento Europeo) y estadounidense (National Recommended Water Quality Criteria 2005), en el 83 % de los casos de cuencas menores a 200 ha, tal como se desprende de lo señalado en el punto 2.2.2.

El valor máximo de eficiencia de depuración de sólidos es de 94,0 % en condiciones de un caudal afluente de 3,6 m<sup>3</sup>/hr, 3 capas de geotextil en el sistema de filtrado, un largo del sistema de filtrado de 70 cm, una concentración media de sedimentos del evento en el afluente de 100 mg/l y una concentración media de aceites del evento de 10 mg/l.

El valor mínimo de eficiencia de depuración sólidos, por su parte, es de 80,7 % en condiciones de caudal afluente de 8,5 m<sup>3</sup>/h, 1 capa de geotextil en el sistema de filtrado, un largo del sistema de filtrado de 110 cm, una concentración media de sedimentos del evento en el afluente de 100 mg/l y una concentración media de aceites del evento de 30 mg/l.

Comparando las condiciones que dan origen a los valores de eficiencia de depuración de sólidos máximos y mínimos parece ser que el caudal y el largo del sistema de filtrado tienen una relación inversa, mientras el número de capas de geotextil es directa. Con respecto a las concentraciones de contaminantes en el afluente esta comparación parece indicar que la concentración media de sólidos no influye en la eficiencia de depuración de sólidos y que la concentración de aceites tendría una relación inversa.

En cuanto a las EMC<sub>s</sub> en el efluente, el valor máximo es de 70,2 mg/l y se produce en condiciones de caudal afluente de 8,5 m<sup>3</sup>/h, 1 capa de geotextil en el sistema de filtrado, un largo del sistema de filtrado 70 cm, una concentración media de sedimentos del evento en el afluente de 300 mg/l y una concentración media de aceites del evento de 30 mg/l.

El valor mínimo para EMC<sub>s</sub> es de 11,8 mg/l que se produce en condiciones de caudal afluente de 8,5 m<sup>3</sup>/h, 3 capas de geotextil en el sistema de filtrado, un largo del sistema de filtrado de 110 cm, una concentración media de sedimentos del evento en el afluente de 100 mg/l y una concentración media de aceites del evento de 10 mg/l.

En el caso de los valores máximos y mínimos de las  $EMC_s$ , la comparación de las condiciones de ambos casos parece señalar que el caudal afluente no tendría influencia sobre ella. En cambio, el número de capas y el largo del sistema de filtrado podrían tener una relación inversa y las concentraciones en el afluente parecen tener una relación directa.

Ahora bien, observando las relaciones de los distintos factores con la eficiencia de depuración de sólidos y la  $EMC_s$  se concluye que el comportamiento de la concentración media de aceites en el afluente y el número de capas de geotextil es opuesto. Esto es esperable dada la relación inversa entre la eficiencia de depuración de sólidos y la  $EMC_s$ . En cuanto al caudal afluente y la concentración media de sólidos en el afluente, estas son nula en un caso y existente en otro. Sin embargo, el comportamiento que más llama la atención es el que tiene el largo del sistema de filtrado que en ambos casos es inversa. Estas dos últimas conclusiones indican que es necesario realizar un análisis más exhaustivo de los resultados, análisis que se presenta en el punto 4.2.2.

En el caso de la eficiencia de depuración de aceites el valor máximo es de 99,9 % debido a que no se detectaron aceites en el efluente (siendo éste el valor mínimo de concentración media de aceite del evento). Esta situación se produce con un caudal afluente de  $8,5 \text{ m}^3/\text{h}$ , 3 capas de geotextil en el sistema de filtrado, un largo del sistema de filtrado de 70 cm, una concentración media de sólidos del evento en el afluente de 300 mg/l y una concentración media de aceites del evento en el afluente de 10 mg/l.

El valor mínimo de eficiencia de depuración de aceites es de 94,1 % que se produce en condiciones de caudal afluente de  $3,6 \text{ m}^3/\text{h}$ , 3 capas de geotextil en el sistema de filtrado, un largo del sistema de filtrado de 110 cm, una concentración media de sólidos del evento de 300 mg/l y una concentración media de aceites del evento de 10 mg/l.

La comparación de condiciones entre el valor máximo y el valor mínimo de eficiencia de depuración de aceites parece señalar que el número de capas de geotextil, las concentraciones de sólidos y aceites en el afluente no tienen influencia. El caudal afluente, por su parte, tendría una relación directa y el largo del sistema de filtrado una relación inversa.

En cuanto al valor máximo de  $EMC_A$ , es de 0,7 mg/l y se produce en tres ocasiones con diferentes condiciones de operación. Sin embargo, en todas ellas la concentración media de aceites del evento es de 30 mg/l y el caudal afluente de 3,6 m<sup>3</sup>/h.

Como ya se dijo anteriormente, el valor mínimo de  $EMC_A$  se produce en el mismo evento que la máxima eficiencia de depuración y corresponde a una situación en que no se detecta aceite en el efluente. Comparando las condiciones de este caso y las del valor máximo se observa que solamente el caudal afluente y la concentración de aceites en el afluente tendrían algún tipo de relación, inversa el primero y directa el segundo.

#### 4.2.2 Consideraciones generales sobre el análisis inferencial de los resultados del Ensayo 1.

##### ***Análisis de normalidad de las variables respuesta.***

La normalidad de las variables de respuesta se analizó mediante la prueba de Shapiro-Wilk (Shapiro y Wilk 1965). Los valores arrojados por esta prueba (Tabla 4.5) confirman que las variables de respuesta: concentración de sólidos totales en el efluente ( $EMC_S$ ), concentración de aceites en el efluente ( $EMC_A$ ), eficiencia de depuración de sólidos ( $Ef_S$ ) y eficiencia de depuración de aceites ( $Ef_A$ ), tienen una distribución normal.

Tabla 4.5. Resultados prueba de Shapiro-Wilk para variables las de respuesta en el Ensayo 1.

Variable respuesta	Estadístico	p-valor
$EMC_S$	0,919	0,123
$EMC_A$	0,974	0,876
$Ef_S$	0,946	0,373
$Ef_A$	0,973	0,844

### ***Análisis de regresión.***

Como primera aproximación se supone un comportamiento lineal de las respuestas del SCPT; es decir, las distintas variables de respuesta pueden describirse según expresiones similares a la Ecuación 4.1.

$$y_i = \beta_0 + \beta_1 Q + \beta_2 C.Fil + \beta_3 C.Lar + \beta_4 C.Sed + \beta_5 C.Ace \quad \text{Ecuación 4.1}$$

Donde:

- $y_i$  : variable de respuesta i-ésima.
- $\beta_i$  : coeficiente de regresión i-ésimo.
- Q : caudal afluente ( $m^3/hr$ ).
- C.Fil : cantidad de capas de geotextil (unidad/filtro).
- C.Lar : largo del sistema de filtrado (cm).
- C.Sed : concentración de sólidos en el afluente (mg/l).
- C.Ace : concentración de aceites en el afluente (mg/l).

Las variables respuestas ( $y_i$ ) estudiadas son:

- $EMC_S$  : concentración de sólidos en el efluente (mg/l).
- $EMC_A$  : concentración de aceites en el efluente (mg/l).
- $Ef_S$  : eficiencia de depuración de sólidos (%).
- $Ef_A$  : eficiencia de depuración de aceites (%).

#### **4.2.3 Análisis de regresión para la concentración de sólidos en el efluente ( $EMC_S$ ) del Ensayo 1.**

El modelo de regresión se determinó por medio de la aplicación del método de regresión de paso a paso o stepwise (MRS) (Navidi 2006). Este método determina dentro de un grupo de variables cuáles de ellas son buenas predictoras del comportamiento de la variable respuesta. En la Tabla 4.6 se presenta el cuadro resumen de resultados del análisis para la concentración de sólidos en el efluente ( $EMC_S$ ) (Anexo IV).

En la tabla se observa que el MRS determinó que existen 3 modelos posibles que describen la  $EMC_s$ . El primero tiene como variable predictora únicamente al caudal (Q), el segundo agrega a la anterior variable predictora la concentración de sedimento en el afluente (C.Sed) y por último, el tercer modelo incluye además la variable predictora capas de filtro (C.Fil).

Tabla 4.6. Resumen del análisis MRS de la  $EMC_s$  en el Ensayo 1.

Modelo	VARIABLES predictoras del modelo	$R^2$	$R^2$ corregido	Error típ. de la estimación
1	Q	0,696	0,677	9,8525
2	Q C.Sed	0,782	0,753	8,6232
3	Q C.Sed C.Fil	0,863	0,834	7,0723

Cualquier otro modelo compuesto por una combinación distinta de las cinco variables contempladas tiene un ajuste mucho menor.

El modelo número 3 es el que tiene el mayor valor de  $R^2$  corregido por lo que es el mejor modelo predictor. A continuación se procedió a comprobar el cumplimiento de los supuestos de normalidad, independencia, varianza y media de los residuos, además de la independencia o no multicolinealidad de las variables predictoras.

La normalidad de los residuos fue analizada mediante la prueba de Shapiro-Wilk, obteniéndose un p-valor de 0,437 para la muestra lo que indica que estos cumplen el supuesto. La independencia de los residuos se analizó mediante el contraste de Durbin-Watson (Navidi 2006) para determinar si existe correlación entre ellos. El valor obtenido es  $DW = 3,026$ ; que para una muestra de 18 ensayos y 3 variables predictoras indica que no existe correlación. Queda así comprobada la hipótesis de independencia de los errores.

En el Gráfico 4.1 se muestra la relación entre los residuos y los valores ajustados. Se aprecia una cierta tendencia en la gráfica (a). Sin embargo, la relación de los residuos y los valores de las variables predictoras (b, c, d) no presentan ninguna tendencia. En consecuencia, se considera que se cumple con la hipótesis de varianza constante de los residuos. Además, la media de los residuos es 0 (Navidi 2006).

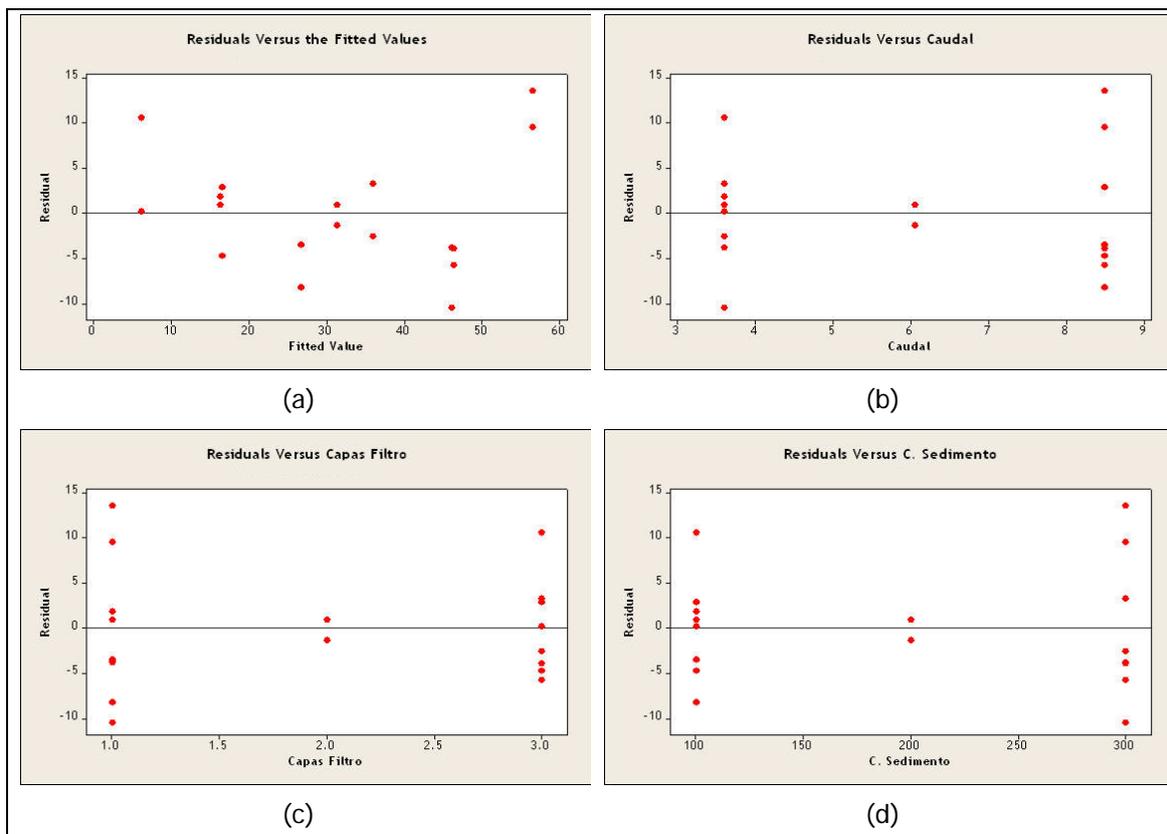


Gráfico 4.1. Gráficos de relación de los residuos del modelo adoptado para la  $EMC_S$  frente a los valores ajustados (a) y los valores de las variables predictoras (b, c, d).

La independencia o no multicolinealidad de las variables predictoras se determinó mediante el análisis de factores de inflación de la varianza (FIV) del programa SPSS Statistics 17.0. El valor de este estadístico es 1,0 para todas las variables predictoras utilizadas en el modelo; consecuentemente, se cumple la condición de no multicolinealidad entre ellas.

Por tanto, las hipótesis de regresión se cumplen para el modelo adoptado para la variable respuesta  $EMC_S$  que tiene como variables predictoras el caudal, la cantidad de capas de geotextil presentes en el sistema de filtrado y la concentración media de sedimentos del evento. Tras comprobarse el cumplimiento de las hipótesis de regresión, se procede a estimar los valores de los coeficientes  $\beta_i$  y el ajuste del modelo. La Ecuación 4.2 representa el modelo definitivo adoptado para la variable respuesta  $EMC_{TS}$ .

$$EMC_S = -1,278 + 2,135Q - 5,094C.Fil + 0,149C.Sed \quad \text{Ecuación 4.2}$$

La ecuación de regresión es altamente representativa del comportamiento de la capacidad de retención de sólidos del SCPT ( $R^2$  de 0,863). En ella se puede observar que la  $EMC_S$  tiene una relación directa con el caudal y con el aporte de sólidos, y una relación inversa con el número de capas de geotextil.

En la Tabla 4.7 se presentan los valores de los coeficientes  $\beta_i$ , los coeficientes tipificados, los intervalos de confianza en un 95 % y los valores de significancia (p-valor) de cada uno de ellos.

Obsérvese que la estimación del coeficiente  $\beta_0$  tiene un p-valor de 0,855, lo que indica que no tiene relevancia para el modelo. Sin embargo, se mantendrá el valor de la constante en el modelo ya que no existe ninguna teoría física que justifique su eliminación (Navidi 2006).

El análisis de los coeficientes estandarizados (Tabla 4.7) señala que el factor que más influye es la concentración de sedimentos (C.Sed) en el afluyente (0,834) y que su importancia es unas tres veces mayor que los factores de caudal (Q; 0,293) y número de capas geotextil (C.Fil; -0,285).

Tabla 4.7. Valores de los coeficientes de regresión, los coeficientes estandarizados, los intervalos de confianza del 95 % y la significancia de los coeficientes para el modelo adoptado para EMC<sub>s</sub> en el Ensayo 1.

Coeficiente		Valores	
$\beta_0$	Coef	-1,278	
	Intervalo de confianza del 95%	de min	-15,694
		max	13,407
	p-valor	0,855	
$\beta_1$	Coef	2,135	
	Coef estandarizado	0,293	
	Intervalo de confianza del 95%	de min	0,587
		max	3,683
	p-valor	0,010	
$\beta_2$	Coef	-5,094	
	Coef estandarizado	-0,285	
	Intervalo de confianza del 95%	de min	-8,886
		max	-1,302
	p-valor	0,012	
$\beta_4$	Coef	0,149	
	Coef estandarizado	0,834	
	Intervalo de confianza del 95%	de min	0,111
		max	0,187
	p-valor	0,000	

Esto se interpreta como que pequeños aumentos en C.Sed requieren un aumento mayor de C.Fil para contrarrestar su efecto. En cambio, para contrarrestar el efecto de un aumento de Q se necesita un aumento similar en C.Fil. Otra interpretación que se desprende del análisis de los coeficientes tipificados es que si existe un barrido de calles efectivo; es decir, si se reduce la entrada de sólidos al SCPT, es posible disminuir el número de capas de geotextil en el filtro para alcanzar una EMC<sub>s</sub> de salida determinada.

En cuanto a los factores que fueron excluidos del modelo, el caso de la concentración de aceite (C.Ace) era esperable y descarta que la presencia de

aceites en el rango de concentraciones estudiada facilite la retención o precipitación de los sólidos en el SCPT. En cambio, el caso de la falta de influencia del largo del sistema de filtrado (L.Fil) no era esperado. Esta respuesta podría deberse a que este factor, asociado al área del filtro, podría cobrar importancia únicamente cuando se empiezan a colmatar los poros de los geotextiles al cabo del tiempo.

En el Gráfico 4.2 se presentan los resultados obtenidos en función de las variables predictoras seleccionadas. Los puntos de color rojo representan los resultados con una C.Sed de 100 mg/l; los de color naranja una de C.Sed de 200 mg/ y los de color verde una C.Sed de 300mg/l. En los planos XZ e YZ se encuentran las representaciones gráficas de la variable respuesta en función de una variable predictorora.

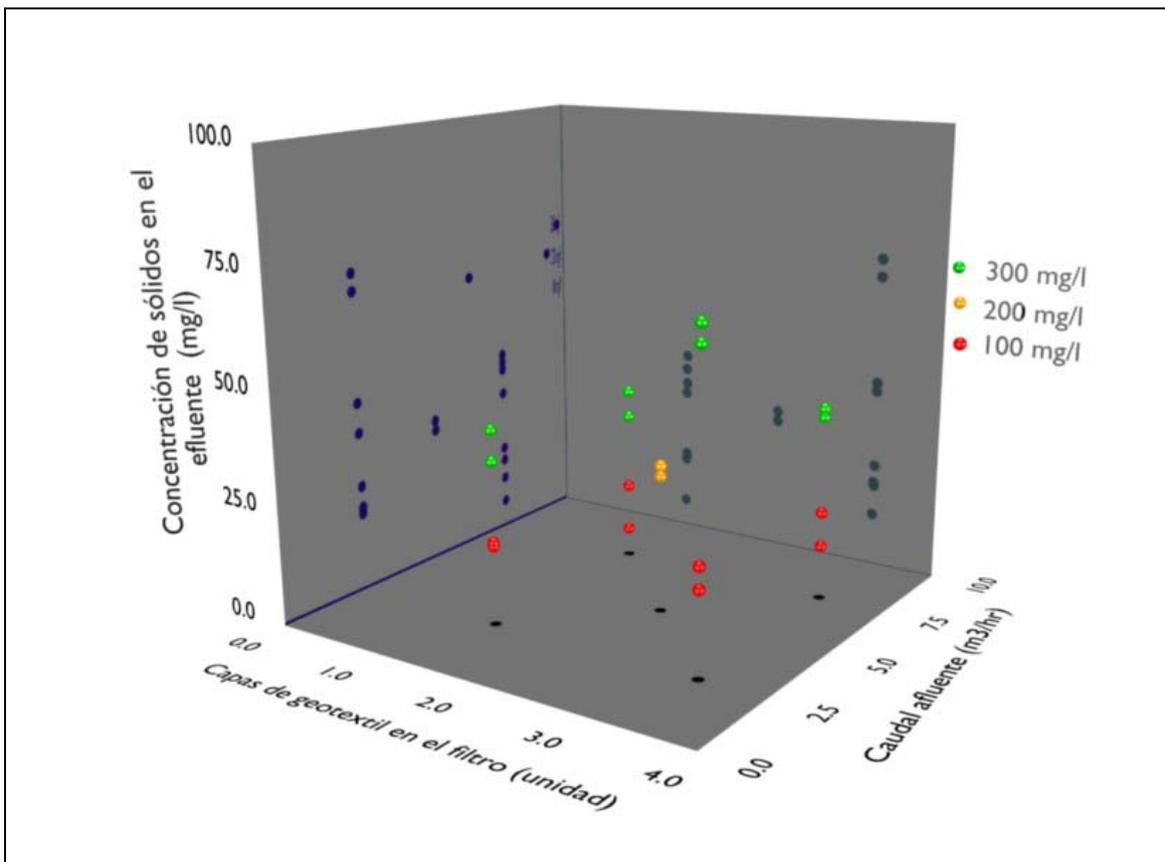


Gráfico 4.2. Resultados obtenidos en el Ensayo 1 en función de las variables predictoras determinadas para EMC<sub>s</sub>.

#### 4.2.4 Análisis de regresión para la concentración de aceites en el efluente (EMC<sub>A</sub>) del Ensayo 1.

Como en el análisis de EMC<sub>S</sub>, el modelo de regresión se determinó por medio del método de regresión paso a paso (MRS). En la Tabla 4.8 se presenta el cuadro resumen de los resultados del análisis para la concentración de aceites en el efluente (EMC<sub>A</sub>) (Anexo IV).

Tabla 4.8. Resumen del análisis MRS para EMC<sub>A</sub> en el Ensayo 1.

Modelo	VARIABLES predictoras del modelo	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> corregido	Error típ. de la estimación
1	Q	0,407	0,370	0,1511
2	Q C.Ace	0,553	0,494	0,1355

La comprobación del cumplimiento de los supuestos para modelos lineales del modelo adoptado para EMC<sub>A</sub> se realizó de igual forma que para la EMC<sub>S</sub>. El p-valor de la prueba de Shapiro-Wilk para comprobar la normalidad de los residuos es de 0,029; por lo que no se cumple la normalidad.

En el caso de la independencia de los residuos; el valor del contraste Durbin-Watson es 1,605, comprobándose la hipótesis de independencia de los errores.

La media de los residuos es cero y el gráfico de residuos; versus los valores ajustados no es simétrico (Gráfico 4.3 a), lo que indica que existe algún tipo de tendencia. Así mismo, en los gráficos de los residuos versus las variables predictoras (Gráfico 4.3 b y c) también presentan asimetría. Luego, los residuos no cumplen la hipótesis de varianza constante.

El valor de este FIV es 1,0 para todas las variables predictoras utilizadas en el modelo; consecuentemente, se cumple la condición de no multicolinealidad entre ellas.

En resumen, dos de las hipótesis de regresión no se cumplen para el modelo adoptado, por lo que se rechaza este modelo de regresión. En consecuencia, no es posible hacer un análisis de regresión lineal para la EMC<sub>A</sub> en el efluente del SCPT en el Ensayo 1.

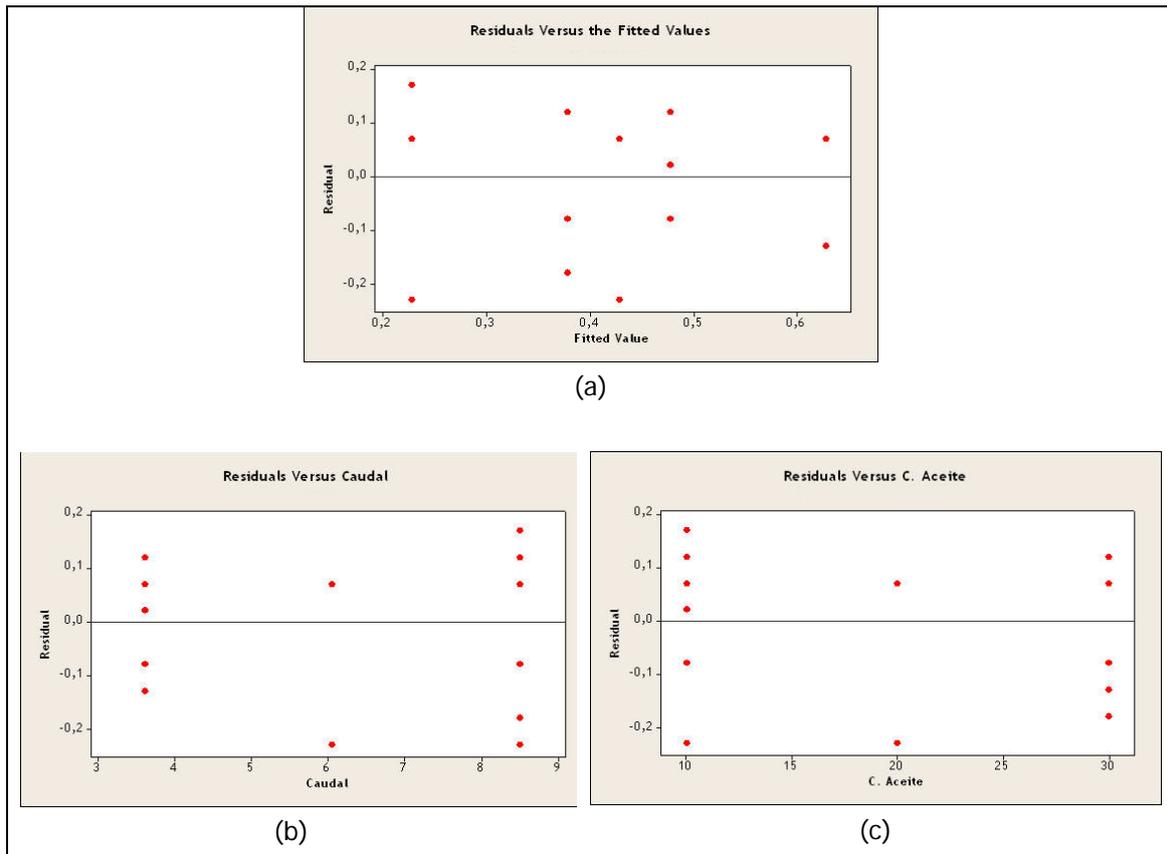


Gráfico 4.3 Gráficos de relación de los residuos del modelo adoptado para la  $EMC_A$  contra los valores ajustados (a) y los valores de las variables predictoras (b, c) correspondiente al Ensayo 1.

#### 4.2.5 Análisis de regresión para eficiencia de depuración de sólidos ( $Ef_s$ ) del Ensayo 1.

El método MRS arrojó un modelo con dos variables predictoras. En la Tabla 4.9 se presenta el cuadro resumen de los resultados del análisis para la eficiencia de depuración de sólidos (Anexo IV).

Tabla 4.9. Resumen del análisis MRS para  $Ef_s$  en el Ensayo 1.

Modelo	Variables predictoras del modelo	$R^2$	$R^2$ corregido	Error típ. de la estimación
1	C.Fil	0,356	0,316	3,0153
2	C.Fil Q	0,531	0,468	2,6596

La comprobación del cumplimiento de los supuestos para modelos lineales se realizó de forma análoga a los descritos anteriormente.

La prueba de Shapiro-Wilk realizada a los residuos arrojó un p-valor de 0,996; lo que señala que los residuos se ajustan a una distribución normal. El contraste Durbin-Watson de los mismos residuos es de 2,024; comprobándose la hipótesis de independencia de los errores.

El gráfico de residuos versus los valores ajustados no es completamente simétrico (Gráfico 4.4 a), existiendo una pequeña tendencia. Ahora bien, como en el caso de  $EMC_s$ , en los gráficos de residuos versus las variables predictoras no se observan tendencias (Gráfico 4.4 b y c). Esto permite concluir que la varianza es constante. Además, se determinó que el valor de la media de los residuos es 0.

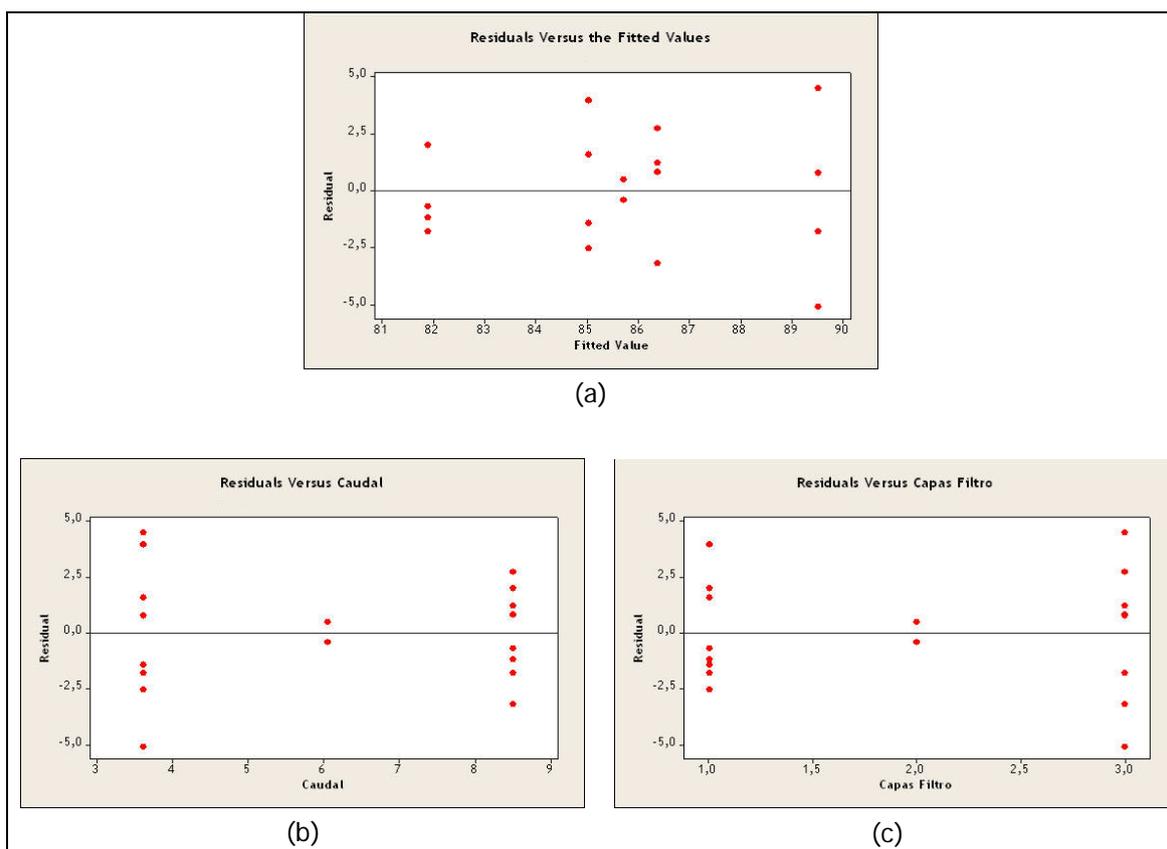


Gráfico 4.4. Gráficos de relación de los residuos del modelo adoptado para la  $Ef_s$  contra los valores ajustados (a) y los valores de las variables predictoras (b, c) correspondiente al Ensayo 1.

Finalmente, las variables predictoras utilizadas en el modelo son independientes unas de otras, porque el valor de este FIV es 1,0 para todas ellas.

En resumen, el modelo adoptado para la variable respuesta  $Ef_s$  cumple las hipótesis de regresión. Las variables predictoras para este modelo son el caudal y la cantidad de capas de geotextil presentes en el sistema de filtrado (Tabla 4.9).

El modelo adoptado para la eficiencia de depuración de sólidos del SCPT queda determinado por la Ecuación 4.3. En la Tabla 4.10, además de los coeficientes  $\beta_i$  se presentan los valores de estos coeficientes estandarizados, los intervalos de confianza en un 95% y sus valores de significancia.

$$Ef_s = +85,089 - 0,640Q + 2,284C.Fil$$

**Ecuación 4.3**

Tabla 4.10. Valores de los coeficientes de regresión, tipificados, intervalos de confianza del 95% y significancia de los coeficientes para el modelo adoptado para  $Ef_s$  en el Ensayo 1.

Coeficiente		Valores	
$\beta_0$	Coef	85,089	
	Intervalo de confianza del 95%	de min	80,390
		max	89,756
	p-valor	0,000	
$\beta_1$	Coef	-0,640	
	Coef estandarizado	-0,417	
	Intervalo de confianza del 95%	de min	-1,219
		max	-0,062
	p-valor	0,032	
$\beta_2$	Coef	2,244	
	Coef estandarizado	0,597	
	Intervalo de confianza del 95%	de min	0,827
		max	3,661
	p-valor	0,004	

El ajuste a la recta de regresión es más bien bajo ( $R^2$  de 0,531). Sin embargo, del análisis de los coeficientes de regresión se extraen interesantes resultados. El factor caudal (Q) tiene una relación inversa con los  $Ef_s$  y directa con el factor capas de geotextil (C.Fil). Como era de esperar, justamente al contrario de lo que ocurre en el caso de los  $EMC_s$ .

Inesperadamente, el factor concentración de sólidos en el afluente es eliminado del modelo de  $Ef_s$ , como se aprecia en la Ecuación 4.3. Esto puede deberse a que la eficiencia de depuración de sólidos es la razón entre la concentración de contaminante en el efluente y la concentración en el afluente. Esto hace que la variable concentración de sólidos en el afluente pase a formar parte de la variable respuesta eficiencia de depuración de sólidos.

Otro aspecto a considerar es que el valor de  $\beta_0$  está dentro del rango de  $Ef_s$  (80,1 - 94,0), por lo que este factor tiene la mayor relevancia en la determinación de la eficiencia de depuración. Bajo esta circunstancia, la corrección realizada por la cantidad de capas de geotextil y de caudal permite una aproximación al valor de la eficiencia de depuración, por lo que son considerados dentro del modelo. En cambio, este ajuste no es mejorado al incorporar el factor concentración de sólidos en el afluente (p-valor de 0,454), siendo eliminado del modelo.

Los coeficientes estandarizados de Q (-0,417) y C.Fil (0,597) tienen una importancia similar pero en sentido inverso. Esto indica que un aumento en el caudal puede contrarrestarse con una variación apropiada del número de capas de geotextil.

Los factores largo del sistema de filtrado (L.Fil) y concentración de aceites (C.Ace) han sido excluidos del modelo, lo que se debe presumiblemente a las mismas razones por las que fueron excluidos del modelo de  $EMC_s$ .

Los resultados obtenidos se muestran en el Gráfico 4.5 en función de las variables predictoras del modelo adoptado. De igual modo que para el caso de  $EMC_s$ , los planos XZ e YZ muestran la representación gráfica de la variable respuesta en función de una variable predictoras.

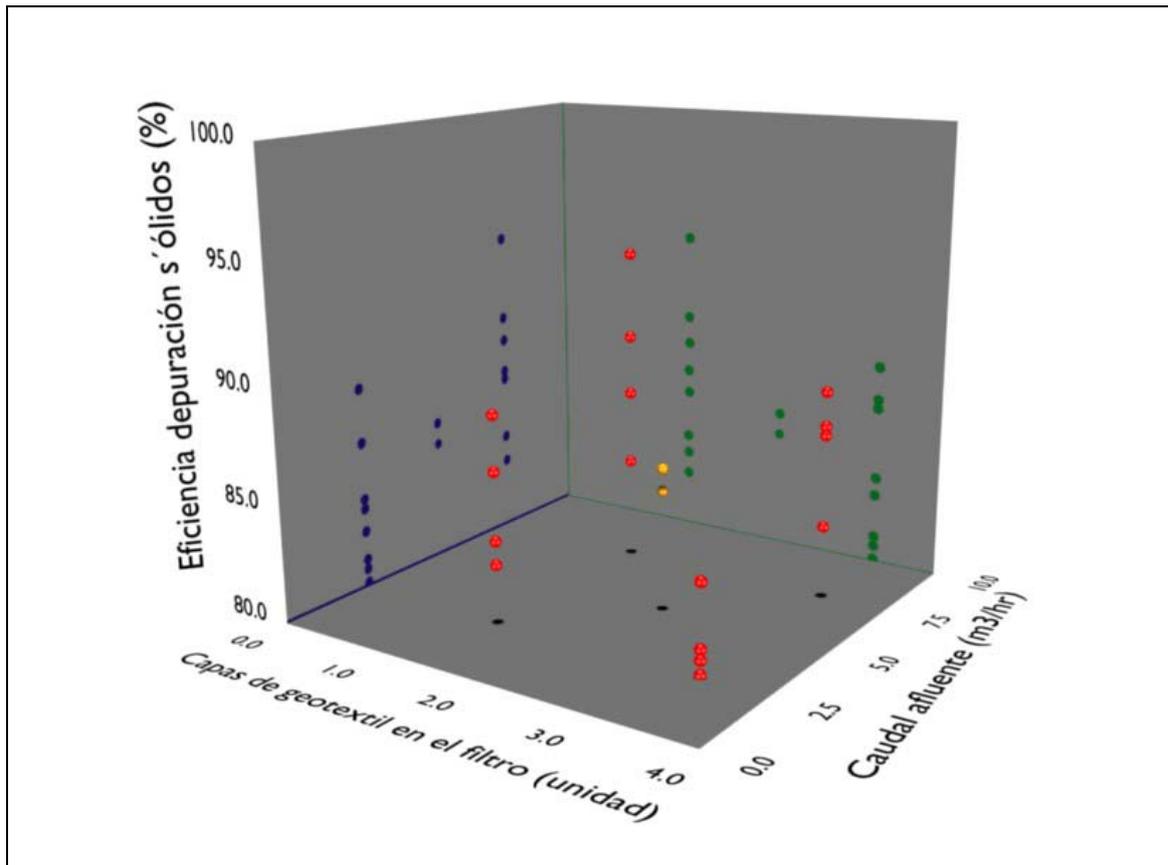


Gráfico 4.5. Resultados obtenidos en el Ensayo 1 en función de las variables predictoras determinadas para  $Ef_s$ .

Aún considerando que el ajuste de la recta de regresión es más bien bajo, se ha confeccionado un ábaco que muestra la capacidad de depuración de sólidos del SCPT (Gráfico 4.6). Para el cálculo del caudal (Q) se utilizó el método racional (Ecuación 4.4) suponiendo un coeficiente de escorrentía de 1,0.

$$Q = \frac{C * i * A}{3.600} \quad \text{Ecuación 4.4}$$

Donde:

- Q : Caudal (l/s)
- C : Coeficiente de escorrentía (adimensional).
- i : Intensidad de la precipitación (mm/hr).
- A : Área de la cuenca (m<sup>2</sup>).

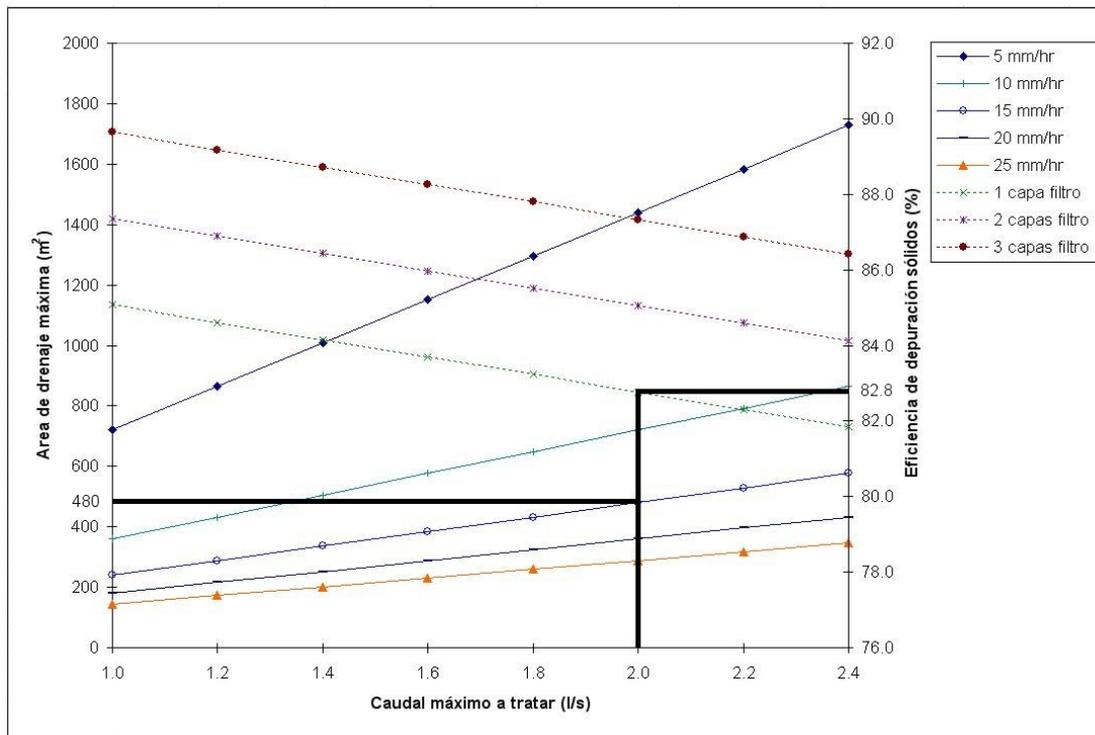


Gráfico 4.6. Ábaco del comportamiento de la eficiencia de depuración de sólidos en el SCPT.

Como ejemplo, se puede ver que para un área impermeable de 480 m<sup>2</sup> sobre la que cae una precipitación de 15 mm/hr, la eficiencia de depuración de sólidos del SCPT es de casi un 83 %, utilizando una única capa de geotextil en el filtro.

#### 4.2.6 Análisis de regresión para la eficiencia de depuración de aceites (Ef<sub>A</sub>) del Ensayo 1.

El mejor modelo obtenido por el método MRS para la eficiencia de depuración de aceites en el SCPT en condiciones iniciales (Ensayo 1) es uno con dos variables predictoras (Anexo IV). Un cuadro resumen de los resultados del análisis se presenta en la Tabla 4.11.

Tabla 4.11. Resumen del análisis MRS para  $Ef_A$ .

Modelo	VARIABLES predictorAS del modelo	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> corregido	Error tíP. de la estimación
1	C.Ace	0,364	0,324	1,2971
2	C.Ace Q	0,547	0,487	1,1306

El p-valor de la prueba de Shapiro-Wilk realizada a los residuos de dicho modelo es 0,117, comprobándose la normalidad de ellos. Por su parte, el valor del contraste Durbin-Watson es de 1,968 para el caso de los residuos de la  $Ef_A$ , por lo que se comprueba la hipótesis de independencia de los errores.

En cuanto a la varianza de los residuos, el gráfico de residuos versus los valores ajustados presenta una tendencia, en especial en la zona central (Gráfico 4.7 a). Sin embargo, al analizar los gráficos de residuos versus las variables predictorAS no se observan tendencias (Gráfico 4.7 b y c). Luego, se concluye que la varianza es constante. Además, la media de los residuos es 0. Por otra parte, el valor de FIV es 1,0; por lo que las variables predictorAS utilizadas en el modelo son independientes.

En resumen, el modelo adoptado para la variable respuesta  $Ef_A$  cumple las hipótesis de regresión. Las variables predictorAS para este modelo son el caudal y concentración de aceite en el afluente. En la Tabla 4.12 se presentan los valores de los coeficientes  $\beta_i$ , de los coeficientes estandarizados, los intervalos del 95 de confianza y los valores de significancia de los coeficientes. Con estos valores de  $\beta$  el modelo adoptado para la eficiencia de depuración de aceites queda representado por la Ecuación 4.5

$$Ef_A = 93,801 + 0,0284Q + 0,098C.Ace$$

**Ecuación 4.5**

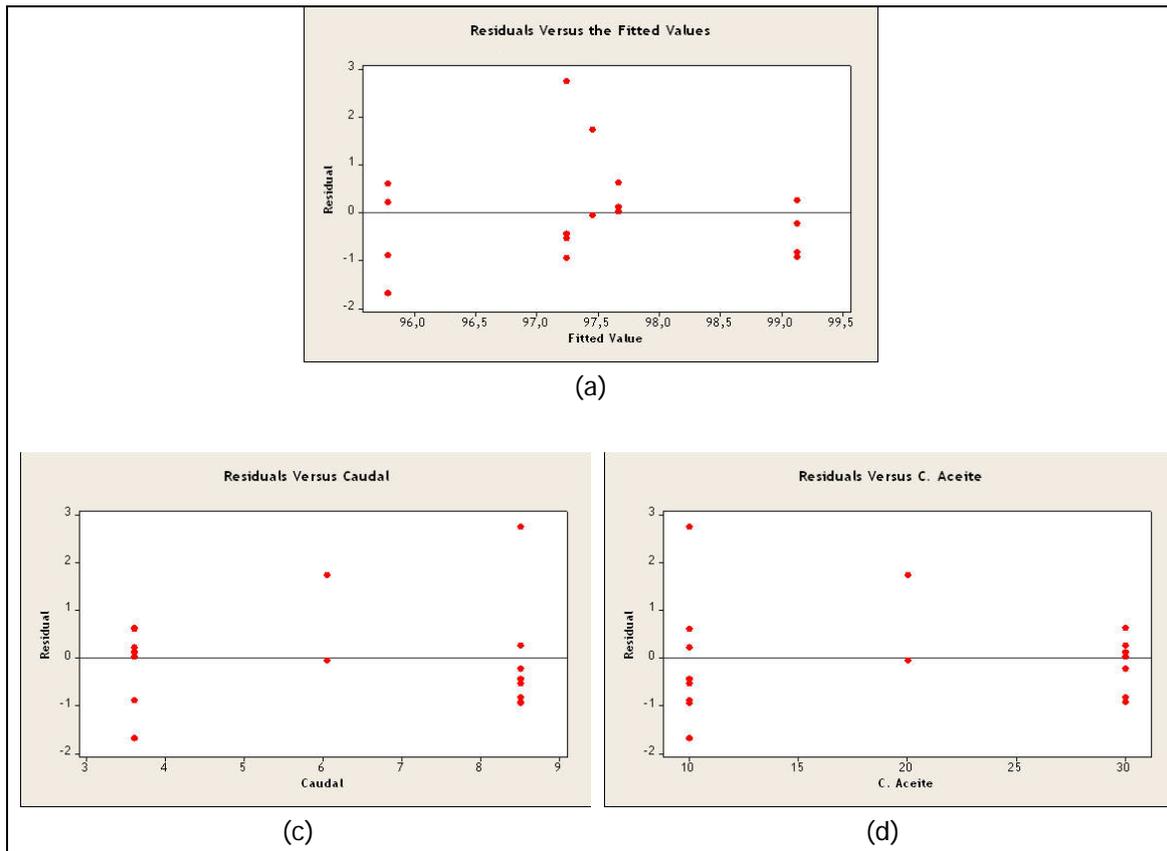


Gráfico 4.7. Gráficos de relación de los residuos del modelo adoptado para la  $Ef_A$  contra los valores ajustados (a) y los valores de las variables predictoras (b, c, d) correspondientes al Ensayo 1.

Tabla 4.12. Valores de los coeficientes de regresión, estandarizados, intervalos de confianza del 95 % y significancia de los coeficientes para el modelo adoptado para  $Ef_A$ .

Coeficiente		Valores	
$\beta_0$	Coef	93,801	
	Intervalo de confianza del 95%	de min	91,803
		Max	95,799
	p-valor	0,000	
$\beta_1$	Coef	0,284	
	Coef estandarizado	0,428	
	Intervalo de confianza del 95%	de min	0,038
		Max	0,530
	p-valor	0,026	

(continua en página siguiente)

Tabla 4.12. Valores de los coeficientes de regresión, estandarizados, intervalos de confianza del 95% y significancia de los coeficientes para el modelo adoptado para  $Ef_A$  en el Ensayo 1(continuación).

Coeficiente		Valores	
$\beta_5$	Coef	0,098	
	Coef estandarizado	0,603	
	Intervalo de confianza del 95%	de min	0,038
		Max	0,158
	p-valor	0,003	

Como en el caso de  $Ef_S$ , para la eficiencia del SCPT en la retención de aceites el ajuste a la recta de regresión es más bien bajo ( $R^2$  de 0,547). Los factores que están relacionados con la eficiencia son el caudal (Q) y la concentración de aceites (C.Ace). El análisis de los coeficientes tipificados señala que tiene más importancia la C.Ace (0,603) que el Q (0,428).

Destacar que, a diferencia del caso de  $Ef_S$ , el factor de concentración del contaminante en el afluente tiene influencia cuando en el caso de  $Ef_S$  desapareció al incorporarse en la variable respuesta. El factor C.Ace, además de mantenerse, es el que tiene más importancia. Esto puede explicarse porque el rango de eficiencia de depuración de aceite es muy estrecho (94,1% - 99,2%), siendo por tanto el coeficiente  $\beta_0$  (93,801) el de mayor incidencia en el valor calculado de  $Ef_A$ , por lo que el valor de C.Ace y Q sólo hacen correcciones menores, de ahí que la concentración de aceites tengan la importancia mostrada por los coeficientes tipificados.

Otro resultado del análisis a destacar es que ninguno de los factores asociados al filtro están presentes en este modelo, lo que indica que el filtro no tiene importancia en la depuración de aceites, al menos durante la fase inicial de uso del SCPT (Ensayo 1). Esto tiene su explicación en que los aceites quedaban atrapados en las caras interiores de las paredes del SCPT (Figura 5.1), perfectamente limpias al inicio de cada ensayo para simular la operación del aparato recién colocado. Por tanto, son estas caras los principales elementos que producen la retención de aceites, no alcanzando el filtro a producir diferencias apreciables en estas condiciones. Esto se aprecia al constatar que

el intervalo de confianza del 95% de  $\beta_0$  es muy similar al mismo intervalo de  $Ef_A$  (Tabla 4.12)

El hecho de que el factor concentración de sólidos no esté considerado en el modelo implica que el contenido de aceites en los sólidos que quedan retenidos en el SCPT no es significativo en comparación con el retenido por las paredes.

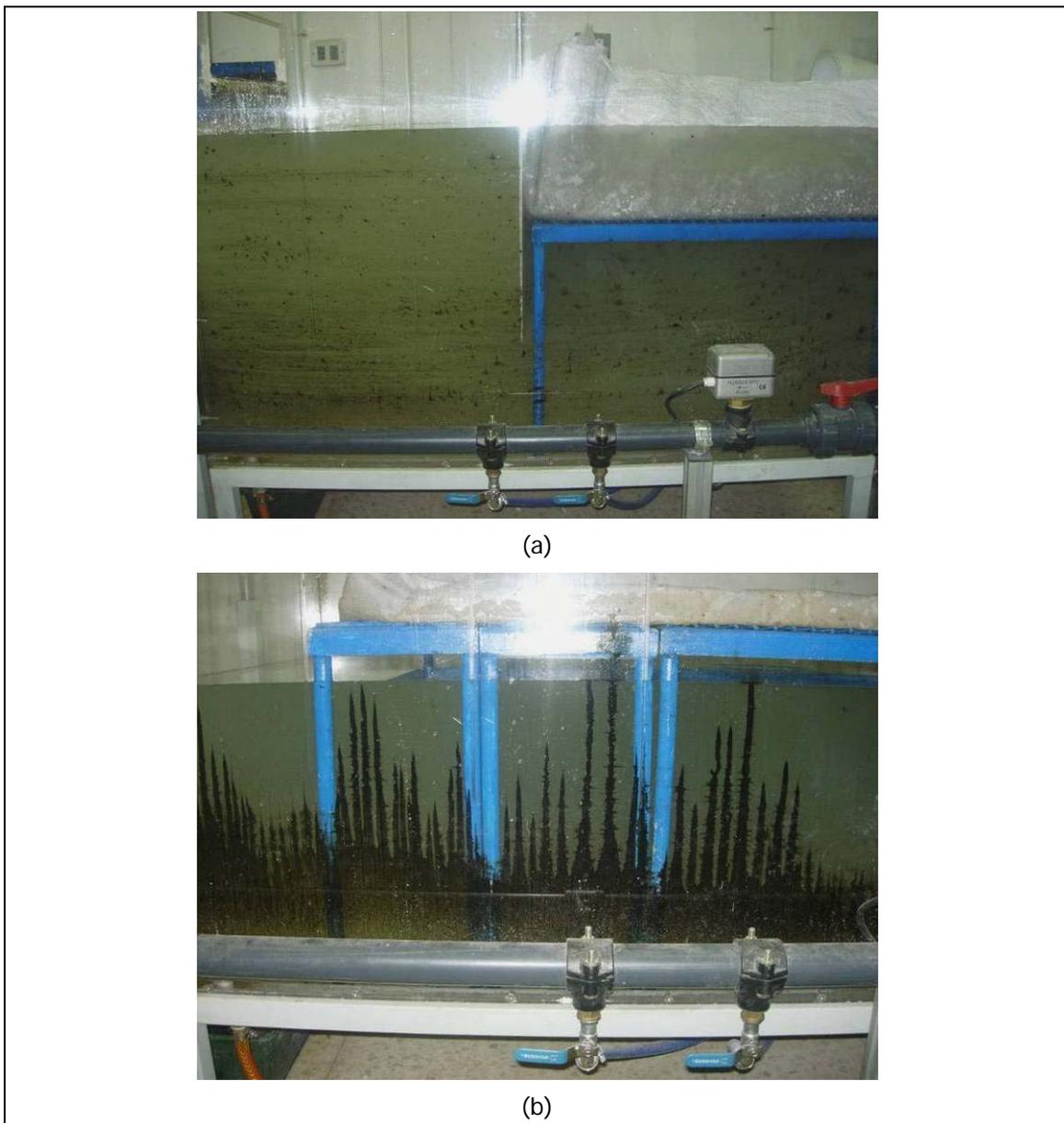


Figura 4.1. Retención de aceite en las paredes internas del SCPT en condiciones (a) de baja concentración de aceites y (b) de alta concentración de aceites.

Los resultados obtenidos se muestran en el Gráfico 4.8 en función de las variables predictoras del modelo adoptado. De igual modo que para el caso de  $Ef_A$ , los planos XZ e YZ muestran la representación gráfica de la variable respuesta en función de una variable predictor.

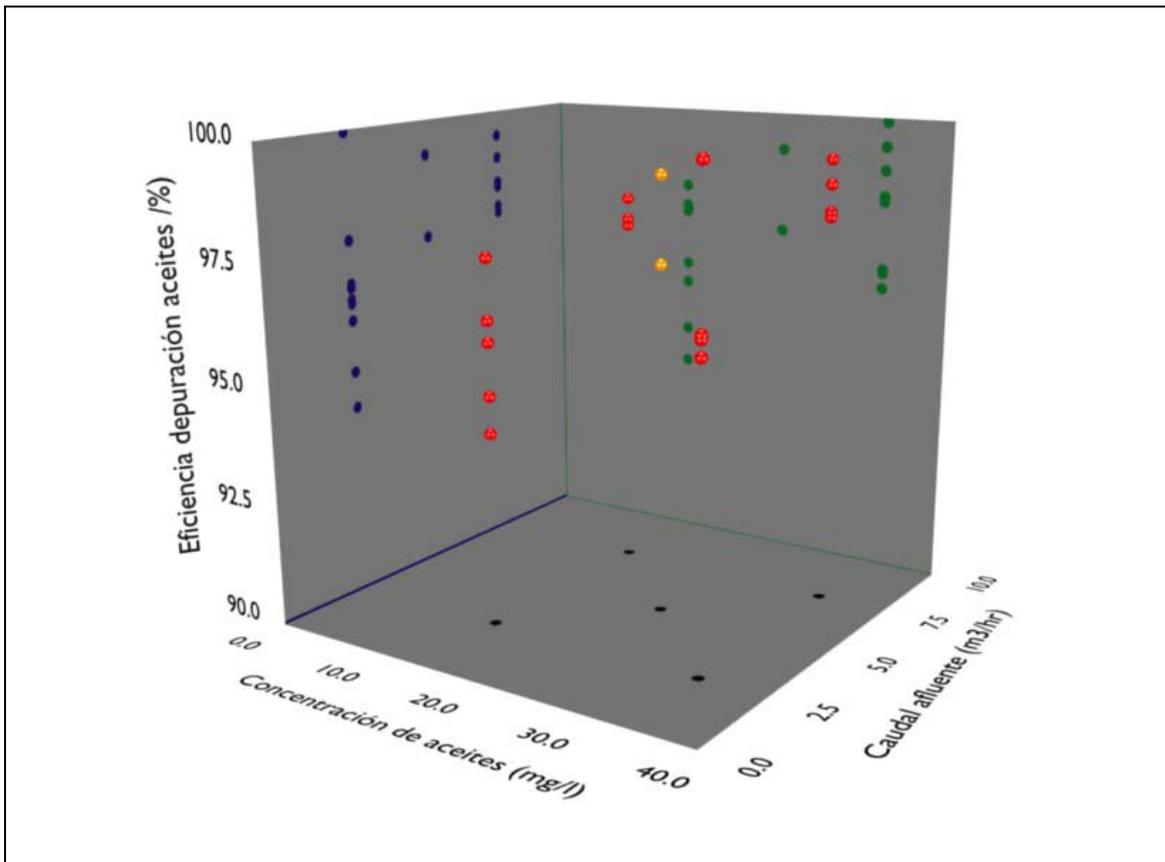


Gráfico 4.8. Resultados obtenidos en el Ensayo 1 en función de las variables predictoras determinadas para  $Ef_A$ .

En el Gráfico 4.9 se presenta el ábaco correspondiente a la eficiencia de depuración de aceites del SCPT. En su preparación se ha empleado la misma metodología que para el Gráfico 4.6, el caudal (Q) calculado por método racional, suponiendo un coeficiente de escorrentía de 1,0 y aplicando el modelo de regresión para el resto de los valores.

El ejemplo utilizado para mostrar la operación del ábaco en la Gráfico 4.9 es el correspondiente a un área de drenaje de 325 m<sup>2</sup> sobre la que cae una precipitación de 20 mm/hr y la concentración media de la cuenca (EMC) de aceite es de 10 mg/l. Bajo estas circunstancias la eficiencia de depuración del SCPT que resulta del ábaco de la Figura 2 es ligeramente superior a 96 %.

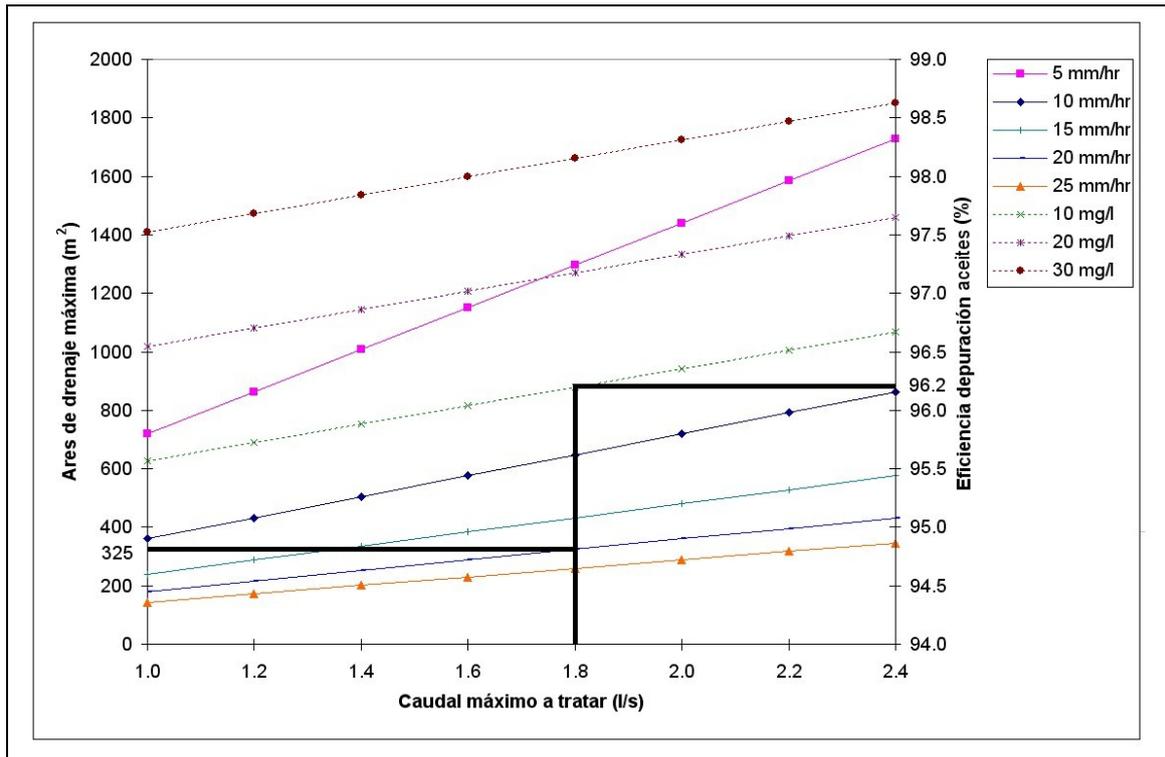


Gráfico 4.9. Ábaco del comportamiento de la eficiencia de depuración de aceite del SCPT.

#### 4.2.7 Resumen de la discusión del análisis de los resultados del Ensayo 1.

En esta etapa se pudo determinar que la cantidad de sólidos presente en el efluente del SCPT ( $EMC_s$ ) depende de la magnitud del caudal afluente ( $Q$ ), de la concentración media durante el tiempo de ensayo de los sólidos en el caudal afluente ( $C.Sed$ ) y del número de capas de geotextil en el sistema de filtrado ( $C.Fil$ ).

De entre los factores de los que depende la  $EMC_s$ , el que tiene más relevancia es la C.Sed, siendo el impacto negativo sobre los efectos de la respuesta; es decir, el aumento de C.Sed hace que la variable respuesta  $EMC_s$  aumente a su vez. En consecuencia, se recomienda controlar este factor mediante el aspirado y/o lavado de calles para evitar que el efluente del SCPT tenga cargas excesivas de sólidos.

Por el contrario, la variación de C.Fil supone un impacto positivo sobre los efectos de la respuesta. Ahora bien, dado que el número máximo de capas de geotextil ensayadas en esta etapa fue tres, se desconocen los efectos que puede conllevar el utilizar un número elevado de capas de geotextil, ni el comportamiento de la variación marginal de  $EMC_s$  debido a C.Fil. Sería necesario realizar un análisis coste/beneficio para evaluar si colocar un mayor número de capas es económicamente justificable.

En el caso de la eficiencia de depuración de sólidos ( $Ef_s$ ) del SCPT, se determinó que depende del caudal afluente ( $Q$ ) y del número de capas del geotextil en el sistema de filtrado (C.Fil). Ambos factores tienen similar importancia aunque en sentido contrario, siendo nuevamente el C.Fil el que tiene un impacto positivo sobre los efectos de la respuesta.

La eficiencia de depuración de aceites ( $Ef_A$ ) depende del caudal afluente ( $Q$ ) y de la concentración de aceites en el afluente (C.Ace). Estos efectos tienen una relevancia relativa ya que se detectó durante los ensayos que los mayores elementos de retención inicial de aceites son las paredes interiores del SCPT. Este efecto podría ser el causante de que sólo existan pequeñas variaciones en la eficiencia de depuración de aceites, y además podría explicar que ninguna de las características estudiadas del sistema de filtrado esté presente en el modelo de regresión adoptado.

Por otra parte, en el desarrollo del Ensayo 1 se observó que los sedimentos presentes en el efluente del SCPT eran de tamaño muy pequeño, que es el que los poros de geotextil dejan pasar a través de él. Como este tamaño es menor que los huecos entre los áridos de caliza del sistema de filtrado empleado, se demuestra que los áridos no cumplen ninguna función de retención de sedimentos como se esperaba en un principio, sino tan sólo una función de lastre de los geotextiles.

### 4.3 Resultados Ensayo 2.

Esta etapa de la investigación tenía por objetivo, tal como se dijo en el punto 3.5, observar la respuesta del sistema ante un uso continuado del SCPT a largo plazo sin que se retiren los contaminantes de su interior.

Durante el período de ensayo el sistema de filtrado se desplazó de su posición debido a la fuerza de empuje ejercida por el agua (Figura 4.2). Ante esta situación se procedió a hacer modificaciones en el anclaje del sistema de filtrado (punto 3.1.2).



Figura 4.2. Desplazamiento del sistema de filtrado producto de la fuerza de empuje ejercida por el agua.

Se decidió limitar el lastre del filtro a 10 kg dado que mantener el filtro fijo en su posición implicaba aumentar la fuerza de empuje sobre las paredes, provocando un alto riesgo de rotura del metacrilato de la estructura del SCPT.

La nomenclatura de los ensayos está dada por una letra E, un número romano y un número latino. La letra E corresponde a la abreviatura de etapa. El número romano I indica que las muestras corresponden a antes del desplazamiento del sistema de filtrado y el número romano II a después del desplazamiento. El número latino indica el número de evento en que se tomaron los datos.

Los números latinos tienen 2 cifras, con lo que se asegura no tener problemas de nomenclatura ya que permite numerar los eventos desde el 01 al 99, cifra esta última muy superior a los eventos realizados.

#### 4.3.1 Análisis descriptivo de los resultados de calidad de aguas obtenidos en el Ensayo 2.

Los resultados correspondientes a este ensayo fueron tomados en los eventos 1, 9, 11 y 14, y se muestran en la Tabla 4.13. En un principio se planificó hacer una toma de muestra cada 10 eventos consecutivos, pero el efecto inesperado de la fuerza de empuje del agua sobre el sistema de filtrado colmatado hizo que se modificara esa consideración tomando muestras cada menos eventos.

Tabla 4.13. Resultados de la etapa EI del Ensayo 2 del SCPT.

Evento	EMC <sub>S</sub>	EMC <sub>A</sub>	Ef <sub>S</sub>	Ef <sub>A</sub>
EI01	22,4	0,3	88,8	98,5
EI09	8,8	0,3	95,6	98,5
EI11	1,2	1,1	94,9	94,5
EI14	15,0	1,0	92,5	95,0

En el Gráfico 4.10 se aprecia que las concentraciones de aceites en el efluente (EMC<sub>A</sub>) se mantienen bajas durante los primeros eventos para posteriormente subir fuertemente, con un factor cercano a tres. Por tanto, la eficiencia de depuración de los aceites (Ef<sub>A</sub>) se mantiene alta durante los primeros eventos, disminuyendo cuando el número de eventos es mayor.

Así mismo, en el Gráfico 4.11 se observa que la concentración de sedimentos (EMC<sub>S</sub>) tiene un comportamiento algo diferente a la EMC<sub>A</sub>. En un principio la EMC<sub>S</sub> tiene una disminución importante llegando a menos de la mitad que en el primer evento, para luego subir nuevamente pero sin llegar a los valores iniciales.

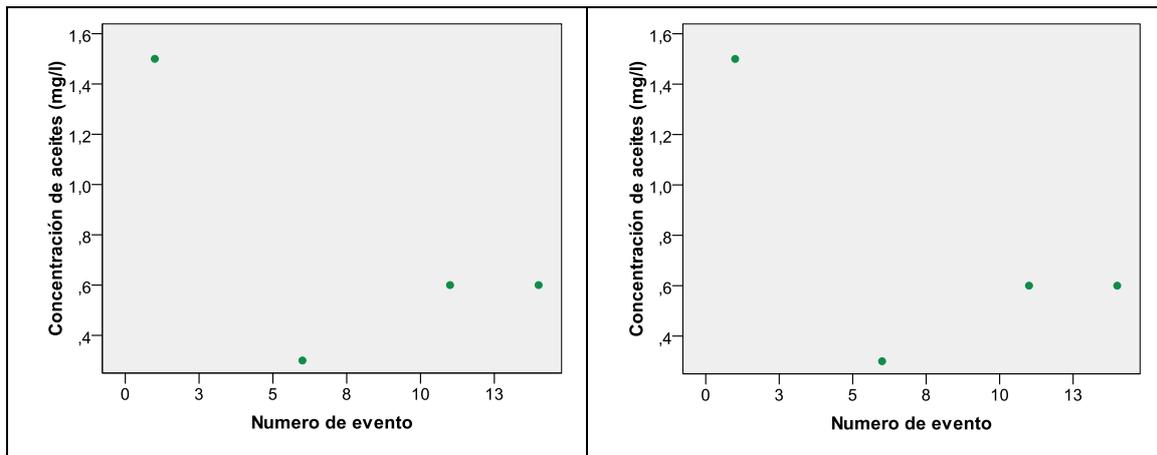


Gráfico 4.10. Concentraciones de aceite ( $EMC_A$ ) y su eficiencia de depuración ( $Ef_A$ ) según el número de eventos simulados realizados en etapa El correspondiente al Ensayo 2.

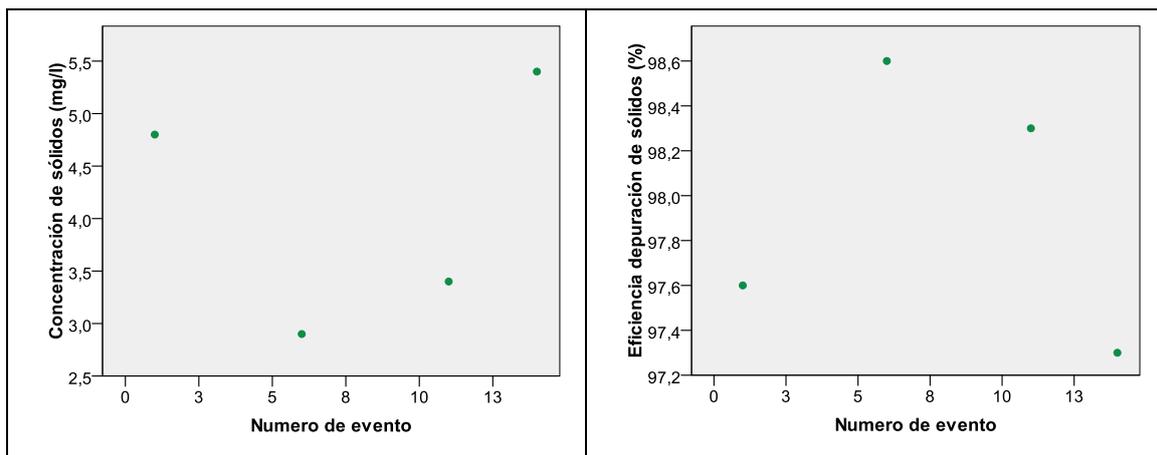


Gráfico 4.11. Concentraciones de sedimentos ( $EMC_S$ ) y su eficiencia de depuración ( $Ef_S$ ) según el número de eventos simulados realizados en etapa El correspondiente al Ensayo 2.

Tras el desplazamiento del geotextil en el evento 14, se procedió a cambiar el geotextil del sistema de filtrado y a volver a realizar los ensayos de largo plazo (punto 3.5). Este cambio se realizó sin retirar los contaminantes del interior del SCPT ni limpiarlo, habiéndose vertido en la rampa de aducción un total de 5600 gr de sedimento y 588 gr de aceite usado.

Esta condición de operación, con un geotextil nuevo y sin limpiar el SCPT, tiene por objetivo determinar el efecto de la resuspensión de sólidos en la eficiencia del SCPT y simular una condición de trabajo del SCPT sin mantenimiento de limpieza, tan sólo con el cambio de filtro.

Los resultados obtenidos suponen una mejora en la capacidad de depuración del SCPT, alcanzando valores similares a los mejores niveles de depuración inicial (Tabla 4.14). Por su parte, el número de eventos consecutivos antes de que se produjera el desplazamiento del sistema de filtrado fue casi la mitad del que se registró con el sistema anterior.

Tabla 4.14. Resultados de carga contaminante en el efluente y eficiencia de depuración del SCPT para la etapa EII del Ensayo 2.

Evento	EMC <sub>S</sub>	EMC <sub>A</sub>	Ef <sub>S</sub>	Ef <sub>A</sub>
EII01	12,5	0,4	93,8	98,0
EII06	6,1	0,2	97,0	99,0

La explicación del comportamiento descrito en este apartado se puede encontrar en que en un principio los poros del geotextil están completamente limpios y tienen su diámetro nominal libre. A medida que transcurren los eventos estos van disminuyendo de diámetro efectivo o se obstruyen debido a los propios sedimentos o al efecto del aire atrapado por el geotextil (ver punto 4.1.2). Esta situación dificulta o impide el paso de partículas de sedimento a través de los poros, aumentando así su retención.

Sin embargo, la disminución del diámetro de los poros o la colmatación de ellos hace que aumente la carga hidráulica sobre el geotextil. Este aumento de presión fuerza a los poros a reabrirse o a desplazar las partículas de sedimento capturadas por él, con el consecuente aumento de la concentración de sedimentos en el efluente. A esta situación se debe sumar el efecto de fugas laterales a través de la holgura de las fijaciones del sistema de filtrado al aumentar la presión en los últimos eventos ensayados antes de producirse el desplazamiento de este último.

En cuanto a la eficiencia de depuración de los sedimentos ( $Ef_s$ ) se observa que tienen un comportamiento inverso pero similar al de los  $EMC_s$ , tal como es de esperar debido a la relación inversa entre estas variables. Tiene por tanto la misma explicación propuesta por el Gráfico 4.12.

#### 4.3.2 Análisis de ajuste de curva con los resultados de calidad de aguas del Ensayo 2.

En el análisis de ajuste de una curva de los resultados de concentración media de contaminantes y eficiencia de depuración de aceites ( $EMC_A$  y  $Ef_A$ ) de esta etapa (Tabla 4.15) se determinó que la curva que más se ajustaba era la compuesta en ambos casos (definida en el Anexo I). Sin embargo, los p-valor para el ajuste señalan que estos tienen niveles de significancia estadística de 76 % y 75 % respectivamente. Estos niveles son relativamente bajos por lo que no se consideran suficientes para la discusión de los resultados (Anexo V).

Tabla 4.15. Tipo de curva de ajuste y p-valor para la significancia del ajuste para la calidad de agua en el Ensayo 2.

	Curva de ajuste	$R^2$	p-valor
$EMC_A$	Compuesta	0,586	0,234
	Lineal	0,569	0,245
	Cuadrática	0,637	0,602
$Ef_A$	Lineal	0,569	0,245
	Compuesta	0,569	0,246
	Cuadrática	0,637	0,602

En el caso del análisis de ajuste de curva para los resultados de la concentración y eficiencia de depuración de sólidos ( $EMC_s$  y  $Ef_s$ ) las que más se ajustaban eran del tipo cuadrática, teniendo en ambos casos significancia estadística con p-valor de 0,020. La Ecuación 4.6 y la Ecuación 4.7 corresponden a las curvas de ajuste  $EMC_s$  y  $Ef_s$  respectivamente. Además, los valores medidos y las ecuaciones ajustadas se muestran en el Gráfico 4.12.

$$EMC_s = 26,087 - 3,920n + 0,0224n^2$$

**Ecuación 4.6**

$$Ef_s = 86,956 + 1,960n - 0,112n^2$$

**Ecuación 4.7**

Donde:

$EMC_s$  : Concentración de carga contaminante de sólidos en el efluente (mg/l).

$Ef_s$  : Eficiencia de depuración de sólidos (mg/l)

$n$  : Número de eventos consecutivos.

Los dos modelos adoptados se verificaron para el cumplimiento de las hipótesis de normalidad, independencia y media de los residuos establecidos para el ajuste curvilíneo de los resultados (Scheaffer y McClave 1995).

La normalidad de los residuos fue analizada mediante la prueba de Shapiro-Wilk, arrojando un p-valor mayor que 0,05 para los dos casos. La independencia se analizó por medio de la prueba de rachas cuyo p-valor fue también mayor a 0,05, también para los dos casos. Finalmente los residuos de  $EMC_s$  y  $Ef_s$  tienen una media de cero, cumpliendo con esta hipótesis. En conclusión, los modelos representados por las Ecuación 4.6 y Ecuación 4.7 son válidos como ajuste curvilíneo.

En el análisis inferencial se puede observar que la eficiencia de depuración de sólidos decae a medida que transcurre el número de eventos. Esto puede ser explicado, como se dijo en párrafos anteriores, por la obstrucción de los poros del geotextil por efecto de las partículas del sedimento.

Entonces, la oclusión de los poros y la pérdida de capacidad hidráulica del geotextil se puede deber a los sólidos. Esto hace suponer que una menor carga de contaminación de sedimentos en el afluente conllevará una mayor vida útil del sistema de filtrado antes de desplazarse o, en un caso más genérico, de colmatarse.

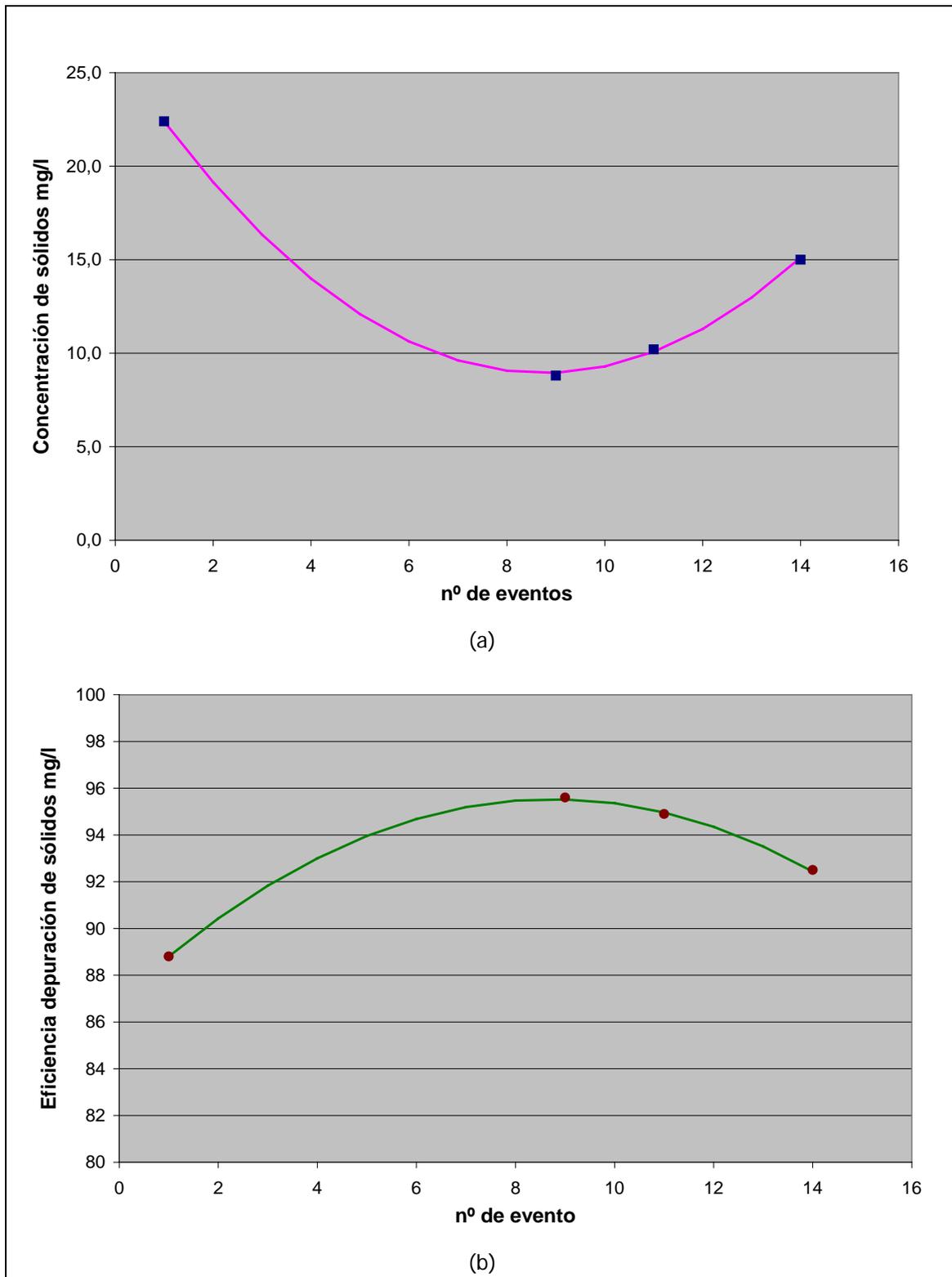


Gráfico 4.12. Curvas ajustadas de (a)  $EMC_s$  y (b)  $Ef_s$  para la etapa El correspondiente al Ensayo 2.

#### 4.3.3 Análisis del desnivel de agua en el SCPT en Ensayo 2.

Como se señaló en puntos anteriores, el geotextil del sistema de filtrado produjo una creciente resistencia al flujo de agua a través de geotextil mismo a medida que se realizaban más ensayos y aumentaba su grado de colmatación. Como consecuencia, el nivel del agua en la zona del tapón hidráulico fue mayor que el nivel del área sobre el sistema de filtrado (Figura 4.3). En la Tabla 4.16 se muestran los valores de este desnivel.

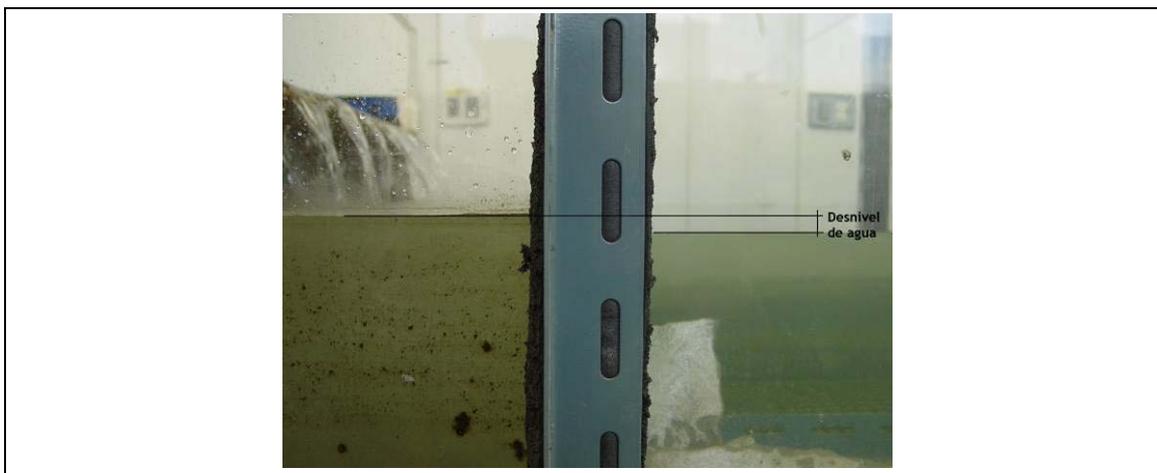


Figura 4.3. Diferencia de nivel de agua entre las zonas del tapón hidráulico y la zona sobre el sistema de filtrado del SCPT.

Tabla 4.16. Valores de desnivel de agua entre las zonas de tapón hidráulico y de la zona sobre el sistema de filtrado del SCPT de la etapa EI correspondiente al Ensayo 2.

Evento	Diferencia de nivel de agua (mm)
EI03	1,6
EI04	3,0
EI05	2,5
EI06	2,5
EI07	3,6
EI09	5,2
EI10	7,5
EI11	6,3

El análisis de ajuste de una curva a los valores de diferencia de nivel del sistema de filtrado arrojó que existen varias curvas posibles con significancia estadística a un nivel de confianza del 95 % y con un coeficiente de regresión superior a 0,870 (Anexo V).

Como elemento discriminador de la curva de mejor ajuste entre las curvas posibles se utilizó el criterio del coeficiente de regresión ajustado (Navidi 2006), siendo las que tienen un mejor ajuste las curvas compuesta, crecimiento y exponencial Tabla 4.17 (definidas en el Anexo I).

Tabla 4.17. Posibles curvas de ajuste a los valores de altura medidos en etapa El correspondiente al Ensayo 2.

	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> ajustado	p-valor
Lineal	0,875	0,857	0,000
Cuadrática	0,876	0,856	0,002
Cúbica	0,910	0,856	0,005
Compuesta	0,884	0,868	0,000
Potencia	0,879	0,862	0,000
Crecimiento	0,884	0,868	0,000
Exponencial	0,884	0,868	0,000

Como en casos anteriores, se realizaron pruebas de normalidad, independencia y media de los residuos establecidos para validar el ajuste curvilíneo de los resultados (Scheaffer y McClave 1995).

En este caso, las tres curvas con mejor ajuste no satisfacen la hipótesis de la media de los residuos igual cero, por lo que fueron descartadas. Continuando el análisis para las restantes curvas posibles, se determinó que las que cumplían todas las hipótesis eran la Lineal y la Cuadrática.

Siguiendo el principio de la navaja de Occam (Navidi 2006), de estas dos se escogió la Lineal por ser la ecuación más simple de ellas (Ecuación 4.8). Su representación gráfica queda recogida en el Gráfico 4.13.

$$H_1 = 0,625n - 0,333 \quad \text{Ecuación 4.8}$$

Donde:

- $H_1$  : Diferencia de nivel de agua entre la zona de tapón hidráulico y la zona sobre el sistema de filtrado del SCPT (mm).  
 $n$  : Número de eventos consecutivos.

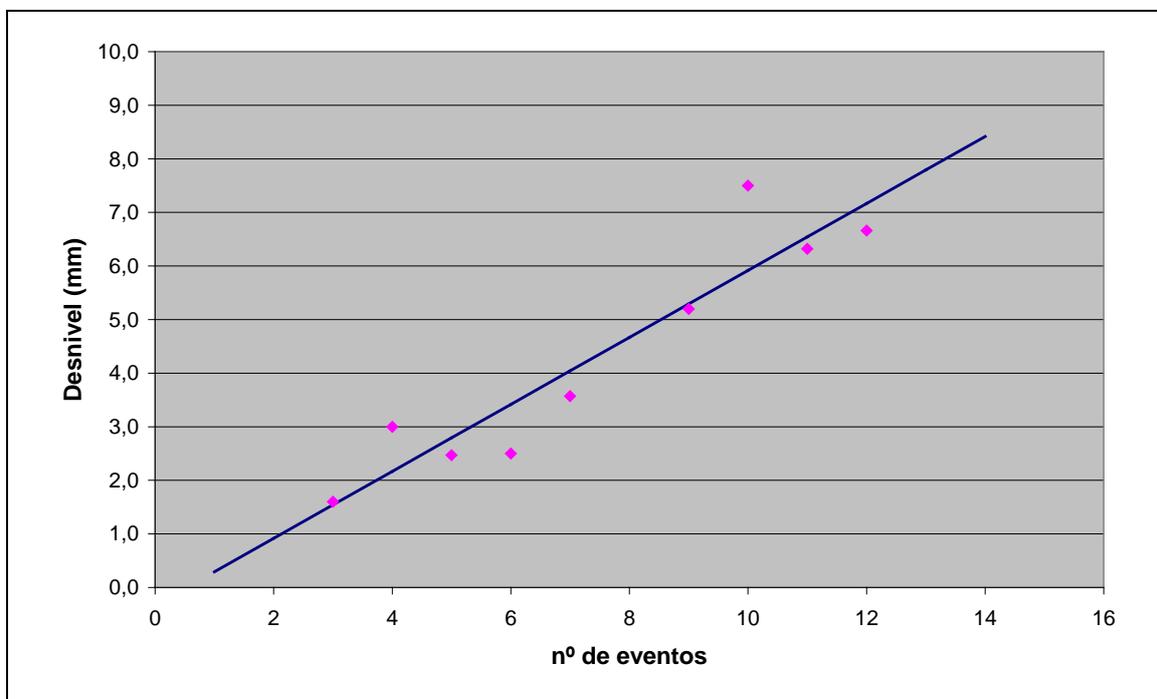


Gráfico 4.13. Valores del desnivel de agua y la recta ajustada para etapa correspondiente al Ensayo 2.

Como se señaló en el punto 4.3.1, después que el sistema de filtrado se desplazara de su posición normal se realizó un cambio del geotextil sin limpiar el SCPT. Igual que en la ocasión anterior, se midió el desnivel entre las zonas de tapón hidráulica y la zona sobre el sistema de filtrado del SCPT. Los valores obtenidos se presentan en la Tabla 4.18.

Se puede observar claramente en la Tabla 4.18 que a medida que transcurren los ensayos la diferencia de nivel se incrementa, de igual modo que en el caso anterior, indicando la aparición de los problemas de colmatación. Sin embargo, al llegar a los eventos finales se produce una estabilización del desnivel, produciéndose el desplazamiento del sistema de filtrado.

Tabla 4.18. Valores de desnivel de agua entre las zonas de tapón hidráulico y en la zona sobre el sistema de filtrado del SCPT, en etapa EII correspondiente al Ensayo 2.

Evento	Diferencia de nivel de agua (mm)
EII01	2,1
EII02	2,9
EII03	6,0
EII04	8,0
EII05	9,0
EII06	9,0

Esto podría indicar que el mayor desnivel, y por lo tanto, el mayor empuje del agua, que el sistema de filtrado tipo C puede resistir estaría en torno a los 9,0 mm. Muy probablemente si se mejorara el sistema de sujeción y/o lastrado del sistema de filtrado esta altura aumentaría. Esta línea de investigación no se continuó debido al riesgo de rotura del cuerpo del prototipo de laboratorio del SCPT, que está construido en metacrilato.

El análisis de ajuste curvilíneo de los valores de los desniveles después del deslizamiento del sistema de filtrado arrojó como resultado varias curvas posibles con coeficientes de regresión mayores de 0,90 y con significancia estadística con un nivel de confianza superior al 95%. Como con el análisis anterior, se utilizó el criterio del coeficiente de regresión ajustado como elemento discriminador para determinar la curva de mejor ajuste, siendo la curva de tipo cúbica la mejor (Tabla 4.19, definidas en el Anexo I).

Tabla 4.19. Posibles curvas de ajuste a los valores de desnivel de agua en la etapa EII correspondiente al Ensayo 2.

	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> ajustado	p-valor
Lineal	0,920	0,899	0,002
Logarítmica	0,924	0,906	0,002
Cuadrática	0,959	0,931	0,008
Cúbica	0,990	0,975	0,015
Potencial	0,943	0,929	0,001

El análisis del cumplimiento de las hipótesis sobre los residuos (Scheaffer y McClave 1995) señala que para el caso de la curva de tipo cúbica se cumple la normalidad, la independencia y la media igual cero. Luego se acepta este ajuste curvilíneo como válido.

La Ecuación 4.9 corresponde a la curva de tipo cúbica que representa la variación de la diferencia de nivel entre la zona de tapón hidráulico y la zona sobre el sistema de filtrado del SCPT para eventos consecutivos sin limpiar ni lavar el SCPT, correspondiente al segundo periodo de uso continuado. Esta ecuación está representada en el Gráfico 4.14, donde se puede observar que se produce un máximo de altura en el evento EII05.

$$H_2 = 2,400 - 1,639n + 1,354n^2 - 0,150n^3 \quad \text{Ecuación 4.9}$$

Donde:

H<sub>2</sub> : Diferencia de nivel de agua entre la zona de tapón hidráulico y zona sobre el sistema de filtrado del SCPT (mm)

n : Número de eventos consecutivos.

En el Gráfico 4.15 se compara la razón de cambio de la Ecuación 4.8 y la Ecuación 4.9 y se observa que en el segundo caso (H<sub>2</sub>) es ostensiblemente mayor. Esto indica que la resistencia al flujo de agua del geotextil aumenta mucho más rápido cuando se ha cambiado el geotextil del sistema de filtrado y el SCPT no ha sido limpiado ni lavado.

Esta situación se puede explicar porque en el caso descrito por H<sub>2</sub> existe una cantidad inicial de contaminante dentro del SCPT, al contrario que en el caso que H<sub>1</sub>. Dado que el agua que ingresa al sistema produce una resuspensión de contaminantes (Begum et al. 2008), la colmatación es más rápida.

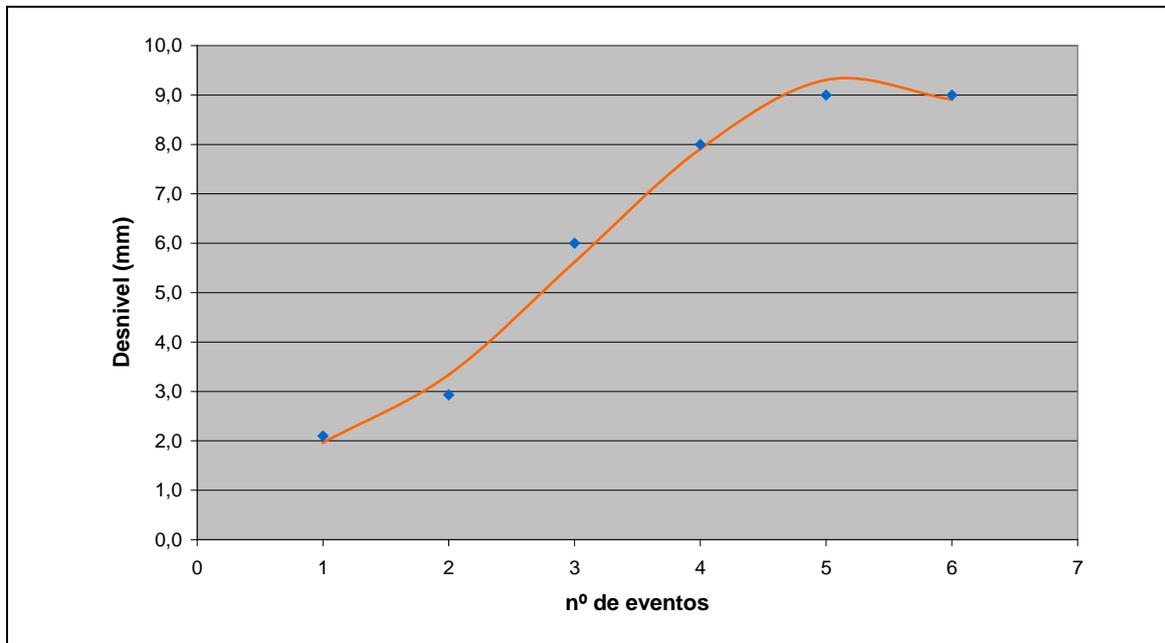


Gráfico 4.14. Valores del desnivel de agua y de la curva exponencial ajustada, en la etapa EII del Ensayo 2.

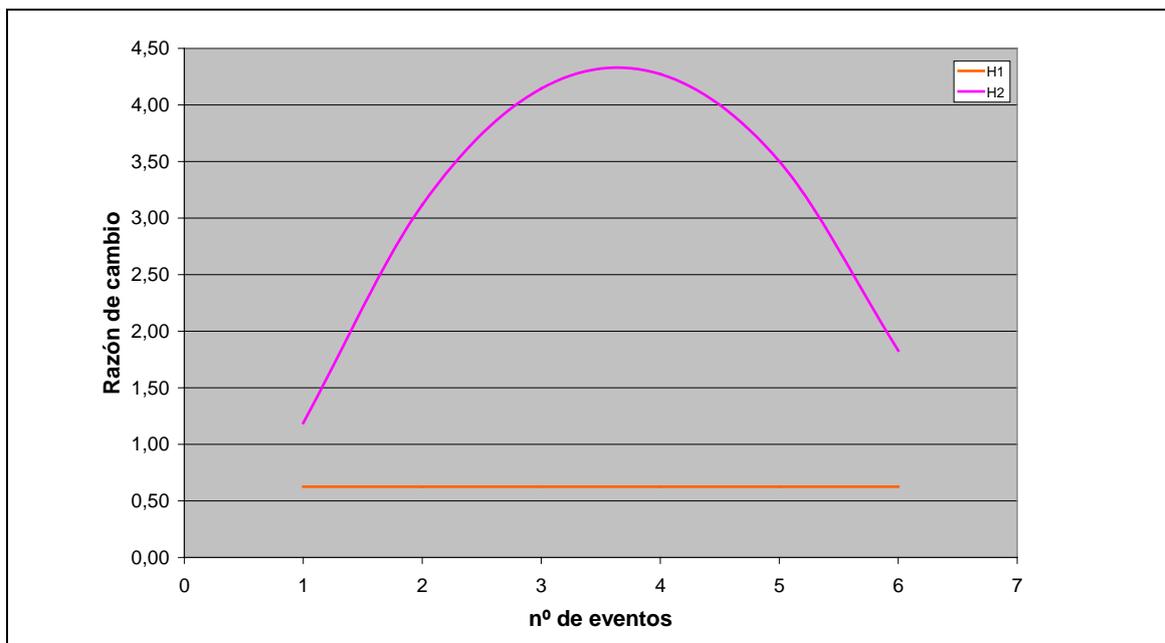


Gráfico 4.15. Razón de cambio de la Ecuación 4.8 y la Ecuación 4.9, correspondientes al Ensayo 2.

#### 4.4 Resultados Ensayo 3

La nomenclatura de este ensayo es similar la empleada en el Ensayo 2; es decir, una letra E de etapa, un número romano y un número latino. En este caso, los números romanos utilizados son III y IV, que corresponden a antes del desplazamiento del sistema de filtrado y a después del desplazamiento respectivamente. El número latino sigue indicando el número de evento en que se tomaron los datos.

##### 4.4.1 Análisis descriptivo de los resultados de la calidad de las aguas del Ensayo 3.

En esta etapa, las muestras de agua fueron tomadas en los eventos 1, 6, 11 y 14, mostrándose en la Tabla 4.20 los valores de los resultados del análisis de las muestras.

Tabla 4.20. Resultados de la etapa EIII al Ensayo 3.

Evento	EMC <sub>S</sub>	EMC <sub>A</sub>	Ef <sub>S</sub>	Ef <sub>A</sub>
EIII01	4,8	1,5	97,6	92,5
EIII06	2,9	0,3	98,6	98,5
EIII11	3,4	0,6	98,3	97,0
EIII14	5,4	0,6	96,4	98,5

Como se observó en la etapa de carga alta (Ensayo 2) que el sistema de filtrado se desplazaba por el empuje del agua (punto 4.3) y que por ello el número de eventos soportados era menor que lo esperado, se decidió tomar muestras cada cinco eventos en vez de cada diez como se planificó en la etapa anterior.

Debido a que la carga de sólidos es menor que en el Ensayo 2, se esperaba que el número de eventos consecutivos antes que el sistema de filtrado fuera desplazado por la fuerza de empuje del agua aumentara. Sin embargo, el desplazamiento se produjo en el mismo número de eventos y con una masa de sólidos de aproximadamente 2.800 gr. Esta situación hace suponer que los sedimentos no son el factor más importante en la disminución de la conductividad hidráulica del geotextil.

Analizando en conjunto estos resultados y los obtenidos en el Ensayo 0 (punto 4.1), se puede deducir que el factor con mayor incidencia en la disminución de la conductividad hidráulica es el aire. La absorción de aire se produce como consecuencia del flujo de agua ascendente que desplaza, a manera de pistón, el aire que se encuentra bajo el sistema de filtrado, obligándolo a pasar a través del geotextil. El aire entonces queda retenido en el tejido del geotextil disminuyendo el diámetro de los poros, y de esta forma disminuyendo su conductividad hidráulica.

En la Tabla 4.20 se observa que las concentraciones de aceite ( $Ef_A$ ) tienen su máximo valor en el primer evento para luego bajar ostensiblemente tras cinco eventos. Esto puede deberse a que durante el primer evento el sistema de filtrado tuviera una conductividad hidráulica especialmente alta, permitiendo el paso de aceite en el agua.

Los siguientes eventos analizados muestran una disminución de la carga contaminante, especialmente el evento 6. Esta situación puede tener una explicación similar a la disminución de la concentración de sólidos en la etapa de carga alta de contaminantes (punto 4.3.1). Es decir, después de varios eventos habría bajado la conductividad hidráulica del geotextil debido a la colmatación de los poros, fundamentalmente por la presencia de burbujas de aire, facilitando la retención de aceite por el sistema de filtrado.

Análogamente, en la Tabla 4.20 se muestra el comportamiento de la concentración de sólidos ( $EMC_S$ ) y de la eficiencia de depuración de los mismos por el SCPT ( $Ef_S$ ). En cuanto a la  $EMC_S$  se puede observar que en un principio tiende a disminuir para posteriormente volver a aumentar hasta valores superiores al inicial, comportamiento similar al observado en la etapa de carga alta (punto 4.3.1). De igual forma, la  $Ef_S$  tiene un comportamiento similar al de la etapa de carga alta; es decir, inicia con un aumento de la eficiencia de depuración y luego se produce una disminución, reflejando la inversa de la  $EMC_S$ .

Estos comportamientos también pueden ser explicados como consecuencia de la pérdida de capacidad hidráulica del geotextil del sistema de filtrado, respondiendo a los mismos razonamientos expuestos con anterioridad (punto 4.3.2).

De igual forma que con la carga alta, una vez que el sistema de filtrado se desplazó se procedió a cambiar el geotextil y realizar nuevamente el ensayo sin retirar los contaminantes del interior del SCPT ni limpiarlo.

Los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 4.21 y muestran que se obtienen valores de eficiencia similares a los obtenidos anteriormente, por lo que el cambio de geotextil asegura mantener o mejorar los niveles de depuración del SCPT a largo plazo.

Tabla 4.21. Resultados de carga contaminante en el efluente y eficiencia de depuración del SCPT para etapa EIV correspondiente al Ensayo 3.

Evento	EMC <sub>S</sub>	EMC <sub>A</sub>	Ef <sub>S</sub>	Ef <sub>A</sub>
EIV01	7,2	0,3	96,4	98,5
EIV06	5,2	0,1	97,4	99,5

#### 4.4.2 Análisis de ajuste de curva de los resultados de calidad de aguas del Ensayo 3.

El análisis del ajuste curvilíneo a los resultados de EMC<sub>A</sub> y Ef<sub>A</sub> determinó que la curva que más se ajustaba en ambos casos era la inversa (definida en el Anexo I). Las curvas inversas para ambas variables son representadas por la Ecuación 4.10 y la Ecuación 4.11 respectivamente y se muestran en el Gráfico 4.16. En ambos casos, las curvas tienen un nivel de confianza de un 95% (Anexo VI).

$$EMC_A = 0,271 + \frac{1,216}{n} \quad \text{Ecuación 4.10}$$

$$Ef_A = 98,053 - \frac{5,426}{n} \quad \text{Ecuación 4.11}$$

Donde:

EMC<sub>A</sub> : Concentración de carga contaminante de aceites en el efluente (mg/l).

Ef<sub>A</sub> : Eficiencia de depuración de aceites (%)

n : Número de eventos consecutivos.

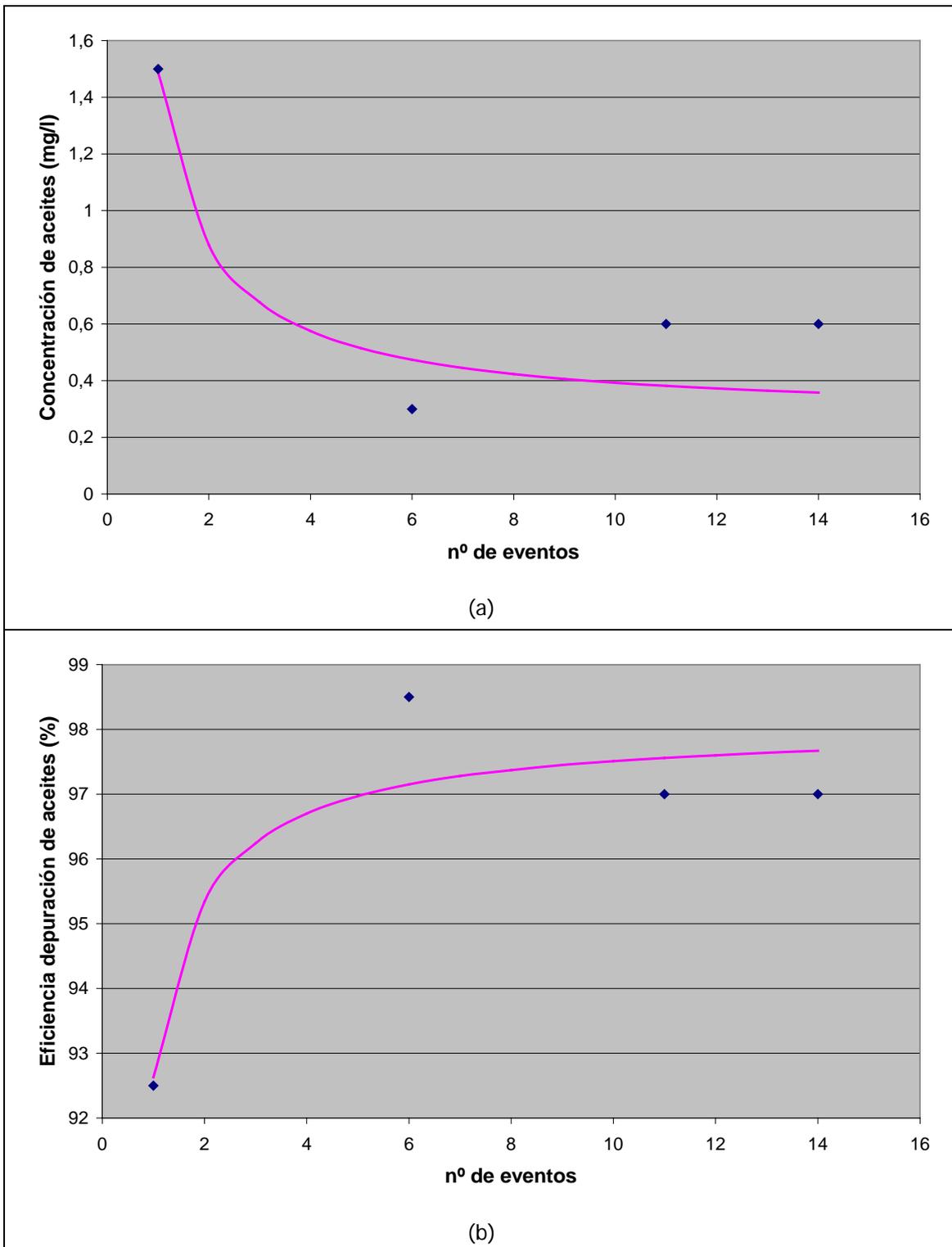


Gráfico 4.16. Tendencia de (a)  $EMC_A$  y (b)  $Ef_A$  para etapa EII correspondiente al Ensayo 3

El cumplimiento de las hipótesis de normalidad, independencia y media de los residuos (Scheaffer y McClave 1995) fue verificado para los modelos de  $EMC_A$  y  $Ef_A$ .

La prueba de Shapiro-Wilk utilizada para determinar la normalidad de los residuos dio un p-valor de 0,855 y 0,139 para  $EMC_A$  y  $Ef_A$ , respectivamente. Mediante la prueba de rachas se determinó la independencia de los residuos, obteniéndose un p-valor de 0,540 en ambos casos. Finalmente, ambos modelos tienen residuos con una media de cero. Por tanto, los modelos representados por las ecuaciones Ecuación 4.10 y Ecuación 4.11 son válidos como ajuste curvilíneo de las correspondientes variables.

Por su parte, los análisis de ajuste de curva para la concentración de sólidos ( $EMC_S$ ) y la eficiencia de depuración ( $Ef_S$ ) determinaron que para ambos casos ninguno de los posibles modelos tenía un nivel de confianza de 95%. En la Tabla 4.22 se presentan los distintos modelos posibles y sus valores característicos (definidos en el Anexo I).

Tabla 4.22. Tipos de curva de ajuste y sus valores característicos para la etapa EIII correspondiente al Ensayo 3.

	Curva de ajuste	$R^2$	p-valor
$EMC_S$	Cuadrática	0,991	0,096
	S	0,122	0,651
	Inversa	0,100	0,684
$Ef_S$	Cuadrática	0,996	0,066
	Inversa	0,100	0,683
	S	0,100	0,684

La curva que tiene un mayor nivel de confianza en ambos casos es la cuadrática, con valores de 90 % y 93 % de confianza para  $EMC_S$  y  $Ef_S$  respectivamente. Los modelos cuadráticos de  $EMC_S$  y  $Ef_S$  corresponden a la Ecuación 4.12 y a la Ecuación 4.13, respectivamente, y sus representaciones se muestran en el Gráfico 4.17 (a y b).

$$EMC_s = 5,76 - 0,799n + 0,560n^2$$

Ecuación 4.12

$$Ef_s = 97,205 + 0,412n - 0,029n^2$$

Ecuación 4.13

Donde:

- $EMC_s$  : Concentración de carga contaminante de sólidos en el efluente (mg/l).  
 $Ef_s$  : Eficiencia de depuración de sólidos (%).  
 $n$  : Número de eventos consecutivos.

La verificación de las hipótesis relativas a los residuos se realizó de forma homóloga a los casos anteriores, siendo los resultados: valores de medias de los residuos iguales a cero, el p-valor en el test de rachas para la independencia de 0,540 en ambos casos y el p-valor para la prueba de Shapiro-Wilk de 0,685 también para ambos casos. Por tanto, se cumplen las hipótesis sobre los residuos y los modelos son correctos.

Los ajustes curvilíneos muestran comportamientos diferentes para los dos contaminantes estudiados. En el caso de los aceites, se observa que la eficiencia de depuración aumenta a medida que se producen las simulaciones de eventos llegando a estabilizarse en torno a un valor cercano al 97 %; en cambio, los sólidos aumentan durante los primeros eventos llegando a un valor máximo cercano al 98 % para luego disminuir a valores menores a los del comienzo del ensayo.

Sin embargo, en el caso de la eficiencia de depuración de sólidos ( $Ef_s$ ) el rango de valores es estrecho, entre 97,29 % y 98,67 %. En términos estrictos, esto representa una variación sobre el valor mínimo de un 1,5 %, lo que se puede interpretar como un comportamiento cuadrático de pequeña amplitud. Por lo tanto, en el caso de la depuración de sólidos las pérdidas de eficiencia son muy bajas a medida que pasan los sucesivos eventos.

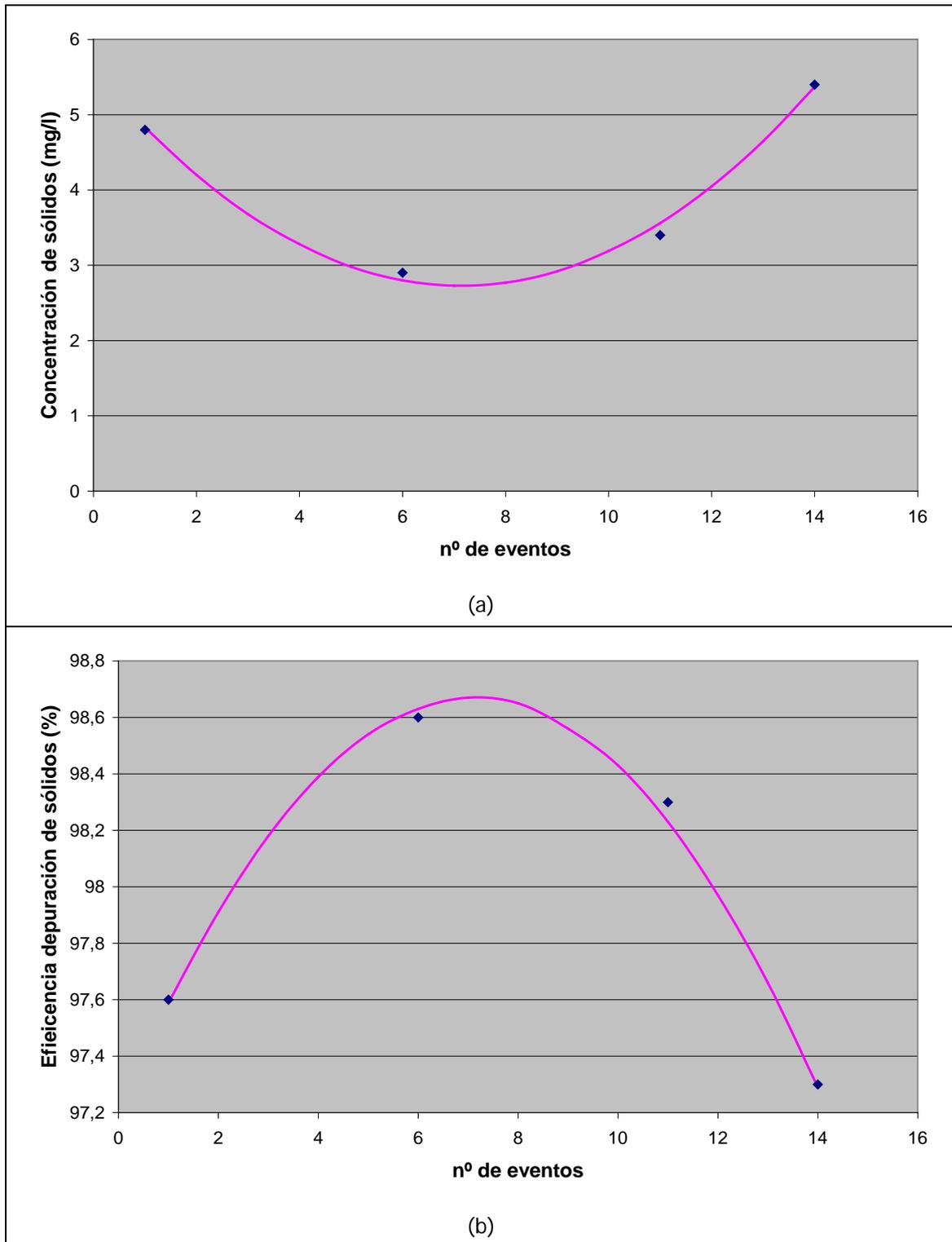


Gráfico 4.17. Tendencia de (a)  $EMC_s$  y (b)  $Ef_s$  para la etapa EIII correspondiente al Ensayo 3.

Consecuentemente, la diferencia de comportamiento entre aceites y sólidos reflejado por el tipo de curva ajustada no es tan grande como en un principio se puede pensar. En ambos casos, los valores tienden a mantenerse estables alcanzado cierto número de eventos aunque, en el caso de los sólidos, se observa una ligera tendencia a disminuir la eficiencia, lo que en un número mayor de eventos puede significar una diferencia importante con el valor de estabilización inicial.

Tal y como se ha comentado anteriormente, la disminución de la eficiencia de depuración de sólidos puede ser explicado por la pérdida de capacidad hidráulica del geotextil. En el caso de los aceites, tiende a mantener un nivel de depuración relativamente constante. Esto puede deberse a que la carga de sólidos no es lo suficientemente alta como para producir una colmatación del geotextil que afecte la eficiencia de depuración del aceites, por lo que en un análisis de mayor tiempo de duración podría apreciarse este efecto.

Este ensayo surgió como complemento para encontrar una respuesta al motivo del desplazamiento del sistema de filtrado en la etapa de carga alta (Ensayo 2). La hipótesis planteada era que la pérdida de capacidad hidráulica del sistema de filtrado era debido a los sedimentos aportados por el efluente, por lo que una disminución de este aporte debería significar un aumento de la vida útil del sistema de filtrado, reflejado en un mayor número de eventos simulados antes de producirse la misma presión sobre el filtro, indicador del nivel de colmatación.

Sin embargo, en esta etapa el sistema de filtrado se desplazó a los 14 eventos al igual que en la anterior. Por lo tanto, se descarta que el factor preponderante en la pérdida de capacidad hidráulica del geotextil del sistema de filtrado sea el aporte de sólidos. De este modo, queda refrendada la hipótesis que es el aire ocluido entre los eventos el principal causante del bloqueo hidráulico del geotextil. Esta respuesta surge de los estudios de capacidad hidráulica del geotextil (Ensayo 0) que se describen y analizan en los puntos 3.3 y 4.1.

#### 4.4.3 Análisis del desnivel de agua en el SCPT en Ensayo 3.

De igual forma que en el caso de carga alta (Ensayo 2) se analizó el desnivel entre la superficie del agua en la zona del tapón hidráulico al SCPT y la zona sobre el sistema de filtrado del SCPT (Anexo VI). Los valores correspondientes a los ensayos previos al cambio de geotextil del sistema de filtrado (punto 4.3) se muestran en el Gráfico 4.18.

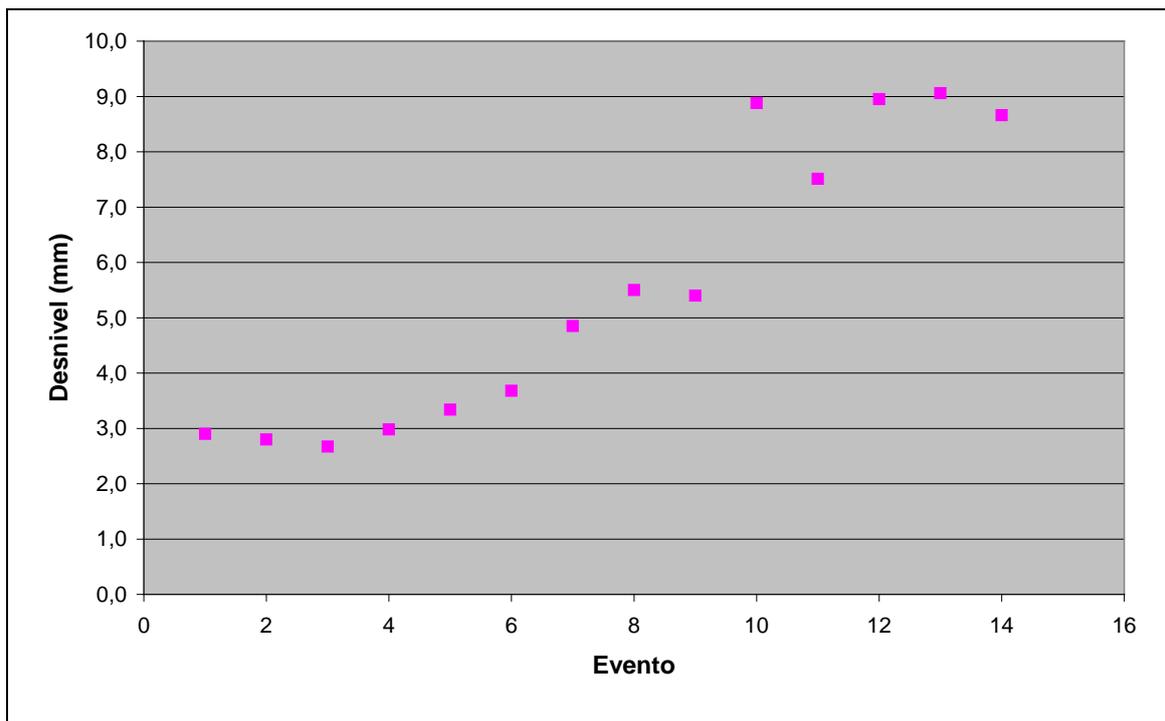


Gráfico 4.18. Valores de desnivel entre la zona de tapón hidráulico y la zona sobre el sistema de filtrado en la etapa EIII correspondiente al Ensayo 3.

En el comportamiento del desnivel de la superficie del agua pueden distinguirse tres fases. La primera es de una ligera disminución durante los tres primeros eventos, la segunda fase es de crecimiento sostenido hasta el evento EIII012 y luego, en la tercera fase, vuelve a disminuir.

El comportamiento de la primera fase puede deberse a que durante los primeros eventos el flujo de agua va creando "caminos preferentes de paso" a través del geotextil, que al consolidarse hacen que el flujo a través del geotextil sea más sencillo.

En la segunda fase, los contaminantes van obstruyendo los poros del geotextil a medida que se siguen los eventos y consecuentemente obstruyendo los “camino preferentes de paso”, haciendo más difícil el paso del agua a través del geotextil.

Finalmente, en la tercera fase se produce un nuevo descenso del desnivel posiblemente debido al comienzo del desplazamiento del sistema de filtrado, lo que permite un mayor paso de agua por el espacio entre el sistema de filtrado y las paredes interiores de la estructura del SCPT.

Después del desplazamiento del sistema de filtrado se procedió a cambiar el geotextil por uno nuevo (punto 4.3), repitiéndose el procedimiento de ensayo con carga media hasta que el sistema de filtrado, con un lastre de 10 kg, se desplazara nuevamente. Los valores obtenidos de desnivel entre las superficies de agua de la zona de entrada y descarga se muestran en la Tabla 4.23.

Tabla 4.23. Valores de desnivel entre la zona de tapón hidráulico y la zona sobre el sistema de filtrado para la etapa EIV correspondiente al Ensayo 3.

Evento	Diferencia de nivel de agua (mm)
EIV01	1,3
EIV02	2,7
EIV03	4,6
EIV04	4,9
EIV05	5,3
EIV06	4,7
EIV07	6,0

Como en otros ensayos, se observa un crecimiento sostenido del desnivel de agua a medida que aumenta el número de eventos. En esta ocasión el valor máximo alcanzado es de 6,0 mm, que es menor a los valores alcanzados en otras etapas.

Esta situación puede deberse al montaje del sistema de filtrado resultando en un menor roce con las paredes internas del cuerpo del SCPT. De esta forma, para desplazarlo se requeriría una menor fuerza de empuje del agua, lo que se manifestaría como una menor diferencia de nivel de la superficie del agua entre la zona de entrada y descarga del SCPT.

Mediante el análisis de ajuste de curva a los resultados de desnivel de superficie de agua antes del deslizamiento del sistema de filtrado, se determinó que existían varias curvas posibles con un nivel de confianza del 95% y con un coeficiente de regresión superior al 0,900 (Tabla 4.24, definidas en el Anexo I).

Tabla 4.24. Posibles curvas de ajuste a los valores de desnivel de agua de la etapa EIII correspondiente al Ensayo 3.

	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> ajustado	p-valor
Cuadrática	0,905	0,887	0.000
Cúbica	0,949	0,934	0.000
Compuesta	0,924	0,917	0.000
Crecimiento	0,924	0,917	0.000
Exponencial	0,924	0,917	0.000

Igual que en los casos anteriores, se utilizó el criterio del coeficiente de regresión ajustado (Navidi 2006) para discriminar cuál de las posibles curvas era la que tiene mejor ajuste. En este caso resultó ser la cúbica (R<sup>2</sup> ajustado de 0,934).

El modelo ajustado es representado por la Ecuación 4.14 y el Gráfico 4.19.

$$H_3 = 4.082 - 1.189 * n + 0.258n^2 - 0.011n^3 \quad \text{Ecuación 4.14}$$

Donde:

H<sub>3</sub> : Diferencia de nivel de agua entre la zona de tapón hidráulico y zona sobre el sistema de filtrado del SCPT (mm)

n : número de eventos consecutivos.

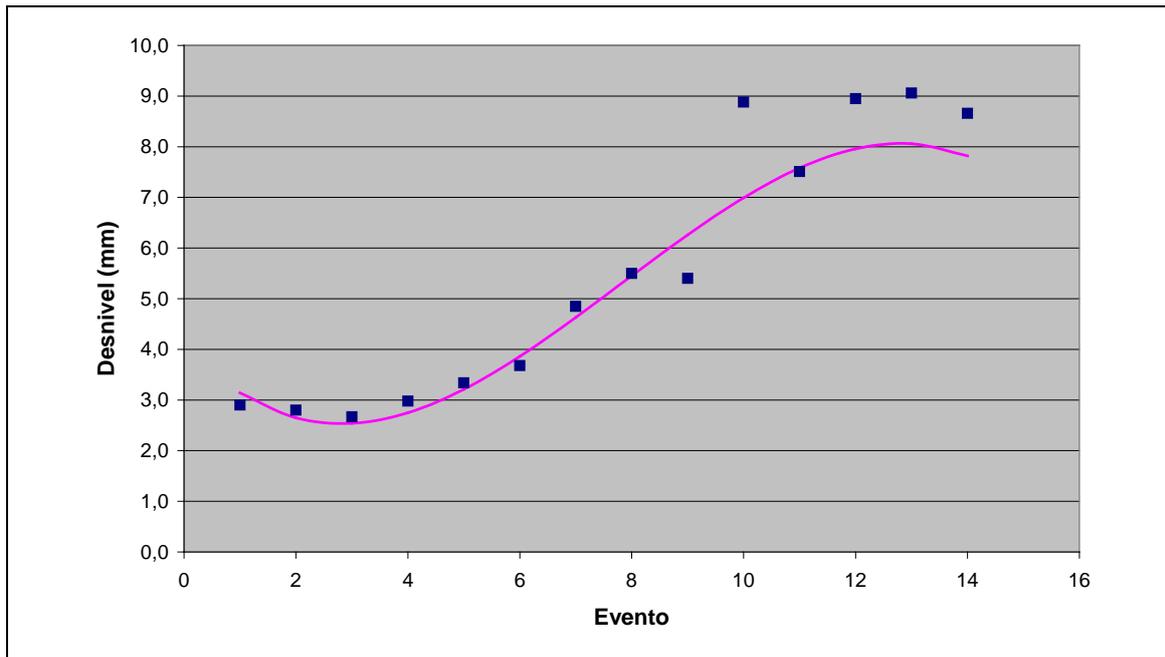


Gráfico 4.19. Valores de desnivel y curva cúbica ajustada para etapa EIII correspondiente al Ensayo 3.

La verificación del cumplimiento de las hipótesis sobre los residuos indica que los residuos de este modelo cumplen con la normalidad, independencia y media igual a cero, por lo que el modelo se considera válido.

En cuanto al análisis de ajuste de curva a los valores de desnivel una vez reemplazado el geotextil del sistema de filtrado, este arrojó varios tipos de curva posibles con un nivel de confianza mayor al 95 % (definidas en el Anexo I). De todas ellas, se escogieron las que tenían un coeficiente de regresión mayor a 0,800 para aplicar el criterio del coeficiente de regresión ajustado (Navidi 2006), (Tabla 4.25), siendo las curvas de tipo cuadrática y cúbica las que tienen el mejor ajuste ( $R^2$  ajustado de 0,866).

Tabla 4.25. Posibles curvas de ajuste a los valores de desnivel de agua en la etapa EIV correspondiente al Ensayo 3.

	$R^2$	$R^2$ ajustado	p-valor
Logarítmico	0,818	0,782	0,005
Inverso	0,845	0,814	0,003
Cuadrático	0,910	0,866	0,008
Cúbico	0,910	0,866	0,008

La verificación del cumplimiento de las hipótesis sobre los residuos señala que en ambas curvas (cuadrática y cúbica) presentan normalidad e independencia de sus residuos y además tienen una media igual a cero.

Después, para elegir una sola curva se siguió el principio de Occam, escogiéndose la curva cuadrática por ser la más sencilla de las dos posibles (Ecuación 4.15). En el Gráfico 4.20 se muestran los valores de desnivel y la curva cuadrática de ajuste.

$$H_4 = -56,633 + 6,157n - 0,152n^2 \qquad \text{Ecuación 4.15}$$

Donde:

- $H_4$  : Diferencia de nivel de agua entre la zona de tapón hidráulico y la zona sobre el sistema de filtrado del SCPT (mm).  
 $n$  : Número de eventos consecutivos.

Comparando la razón de cambio de la Ecuación 4.14 y la Ecuación 4.15 (Gráfico 4.21), se observa claramente que el segundo caso es mucho mayor que el primero. Esta situación es similar a la descrita en el Ensayo 2 anterior (punto 4.3.3); es decir, la resistencia al flujo del agua del geotextil aumenta mucho más rápido cuando se ha cambiado el geotextil del sistema de filtrado del SCPT y no se han retirado los contaminantes retenidos en el mismo, lo que puede ser explicado por la resuspensión de los contaminantes acumulados en el fondo del SCPT y porque la colmatación depende del aire ocluido entre eventos.

Además, la razón de cambio de la Ecuación 4.14 va aumentando a medida que transcurren los eventos consecutivos y cambia de signo, lo que muestra que comienza un crecimiento de los valores de desnivel de agua debido a la oclusión de los poros.

Por su parte, la razón de cambio de la Ecuación 4.15 va decreciendo a medida que transcurren los eventos, lo que indica que los valores de desnivel de agua se van acercando a un valor máximo.

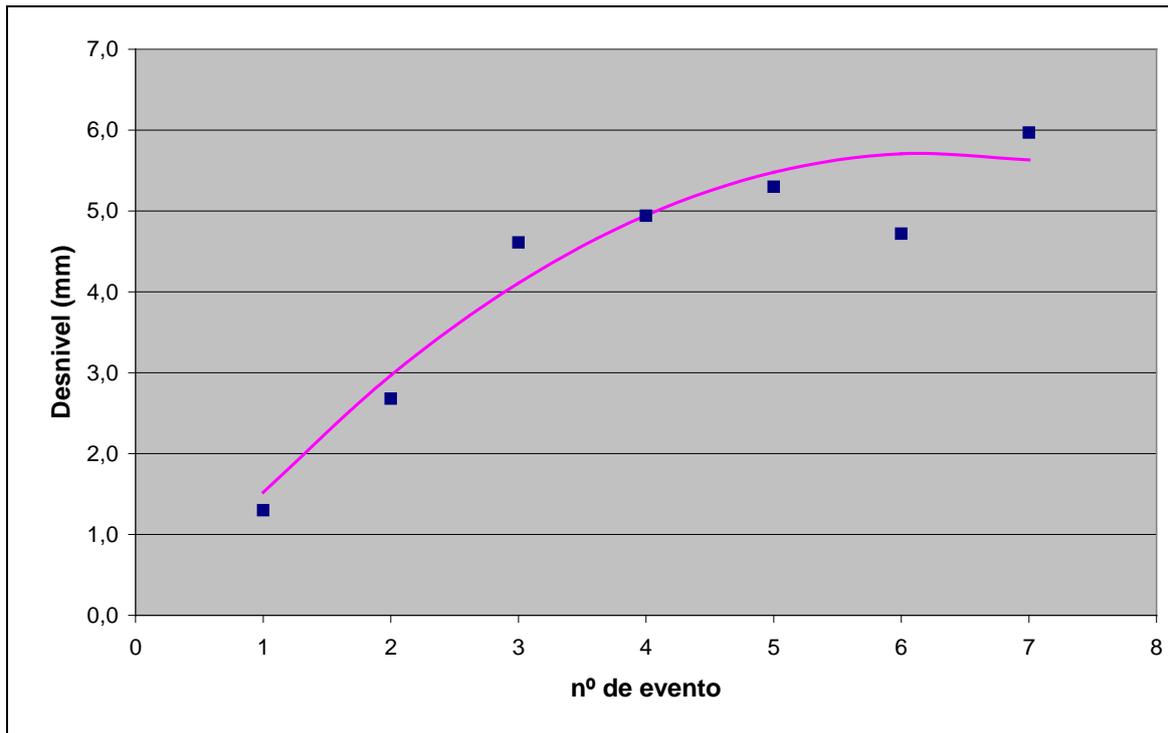


Gráfico 4.20. Valores de desnivel y curva cuadrática ajustada etapa EIV correspondiente al Ensayo 3.

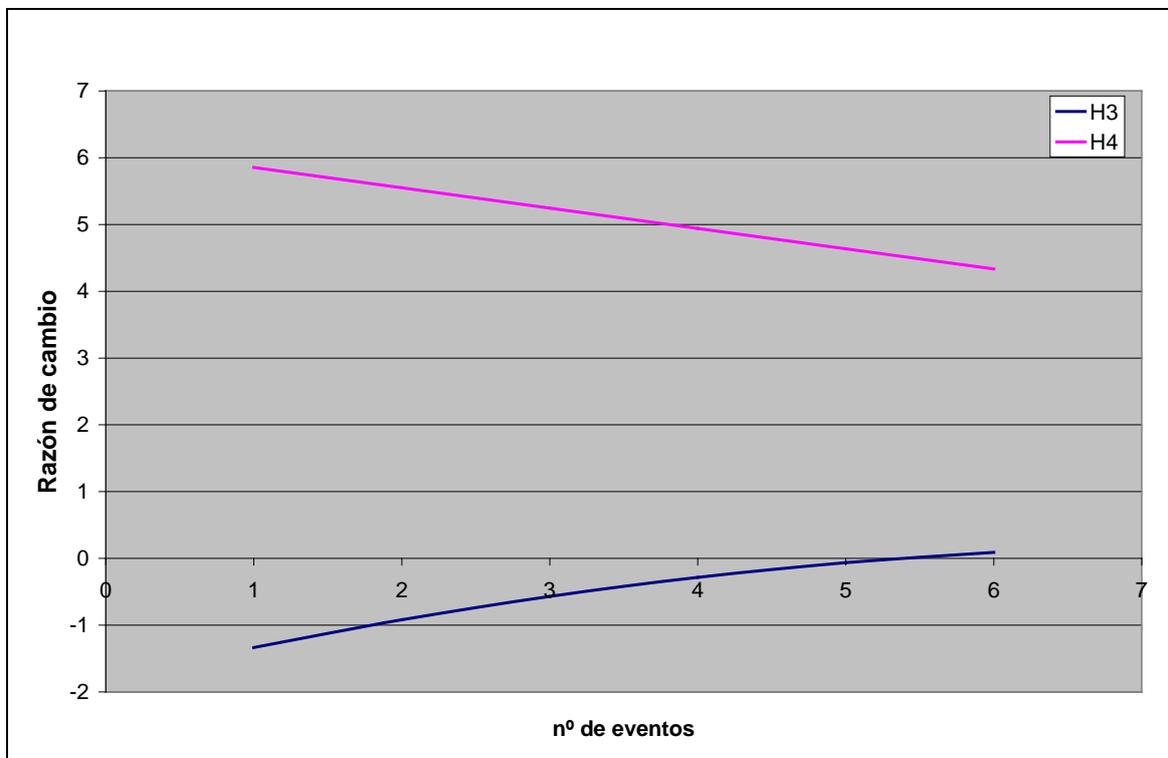


Gráfico 4.21. Razón de cambio de la Ecuación 4.14 y Ecuación 4.15

#### 4.5 Análisis comparativo de los resultados del Ensayo 2 y del Ensayo 3.

Tras analizar el comportamiento de las respuestas de las etapas de carga alta (Ensayo 2) y carga media (Ensayo 3) de contaminante, se realizó un análisis comparativo con el objeto de determinar si existen diferencias en las eficiencias de depuración ante distintas condiciones de largo plazo (Anexo VIII).

##### 4.5.1 Comparación de eficiencias de retención de sólidos.

Los valores de eficiencia de depuración de sedimentos ( $EMC_s$ ) presentados anteriormente en las tablas Tabla 4.13 y Tabla 4.20 fueron analizados en conjunto mediante la prueba de Shapiro-Wilk (Shapiro y Wilk 1965). El resultado indica que los valores presentan un comportamiento normal (p-valor de 0,169). Una vez establecida la normalidad de la muestra se procedió a realizar la prueba de la-t (Milton y Arnold 2003) la que señala que ambas muestras son diferentes con un nivel de confianza del 94% (p-valor de 0,059).

Analizando los estadísticos descriptivos de estos resultados (Tabla 4.26), se puede observar que el valor máximo de la eficiencia de depuración con carga alta es menor que el valor mínimo de la eficiencia de depuración con carga media. Esto refuerza la consideración que la eficiencia de depuración de ambos casos se diferencia entre sí.

Tabla 4.26. Estadísticos descriptivos de la eficiencia de depuración de sólidos en condiciones de carga alta y carga media.

Etapa	Media	Mínimo	Máximo	Amplitud del Rango
Carga Alta	92,95	88,80	95,60	6,80
Carga Media	97,95	97,30	98,60	1,30

En el Gráfico 4.22 se muestra más claramente la diferenciación entre las eficiencias de depuración de sólidos entre las condiciones de carga alta y carga media. En dicho gráfico se observa que la curva de ajuste de los

resultados con carga media se encuentra sobre la curva de ajuste de los resultados con carga alta, por lo que, en comparación, se deduce que mientras menor sea la carga contaminante en el afluente se conseguirán valores mayores de eficiencia de depuración a largo plazo.

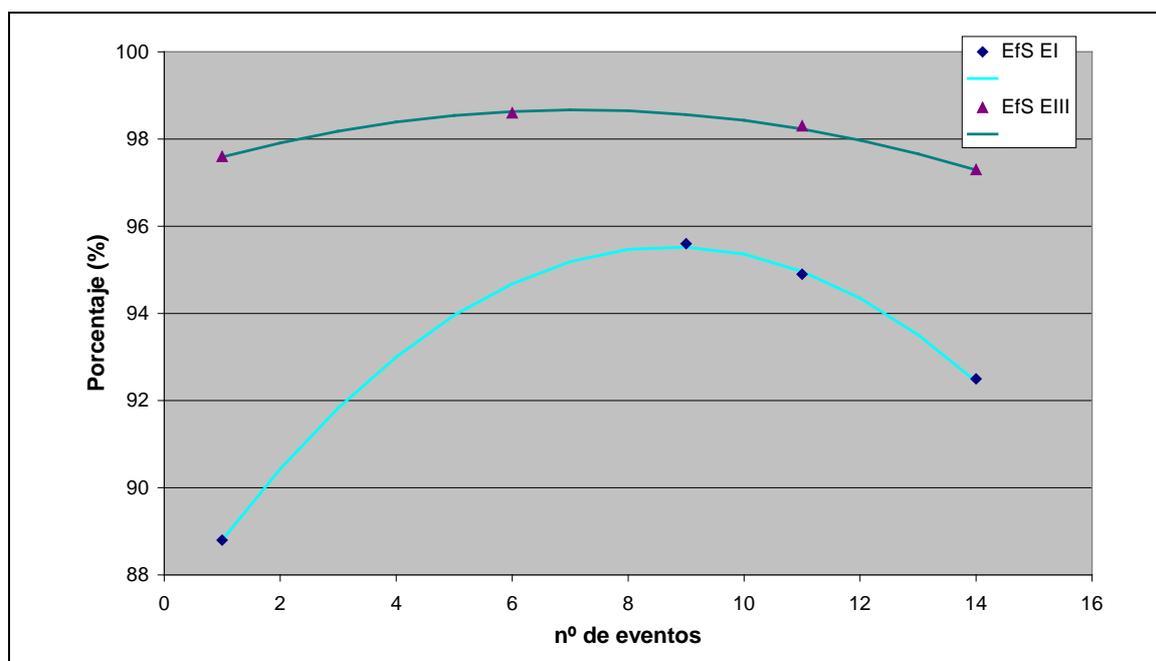


Gráfico 4.22. Valores y curvas ajustadas de la eficiencia de depuración de sólidos en condiciones de carga alta y carga media.

#### 4.5.2 Comparación de eficiencias de retención de aceites.

Los valores de eficiencia de depuración de aceites ( $Ef_A$ ) del SCPT presentados en las tablas Tabla 4.13 y Tabla 4.20 fueron analizados en conjunto mediante la prueba de Shapiro-Wilk (Shapiro y Wilk 1965) obteniéndose un p-valor de 0,165 por lo que la muestra es normal. Con esta condición cumplida se realizó la prueba de la-t (Milton y Arnold 2003) dando como resultado que no se aprecian diferencias estadísticamente significativas entre las respuestas de las condiciones de carga alta y carga media. Esto se ve claramente en la Tabla 4.27, donde las medias para cada condición son muy similares entre ellas y con la media de todo el conjunto de datos.

Tabla 4.27. Estadísticos descriptivos de la eficiencia de depuración de aceite en condiciones de carga alta, carga media y globales.

Etapa	Media	Mínimo	Máximo	Amplitud del Rango
Carga Alta	96,63	94,50	98,50	4,00
Carga Media	96,25	92,50	98,50	6,00
Global	96,44	92,50	98,50	6,00

Realizado un análisis de ajuste curvilíneo se determinó que no es posible ajustar una curva con un nivel de confianza aceptable y un coeficiente de regresión alto para todos los datos. A modo de ejemplo, en la Tabla 4.28 se muestran las tres posibles curvas con mayor coeficiente de regresión (definidas en el Anexo I).

Tabla 4.28. Posibles curvas de ajuste a los valores de eficiencia de depuración de aceites.

Curva	R <sup>2</sup>	p-valor
Cúbica	0,280	0,692
Cuadrática	0,174	0,620
Inversa	0,052	0,586

Por otra parte y de forma complementaria, se analizó de manera diferente la eficiencia de depuración de aceites a largo plazo. Esta forma consiste en comparar la concentración de aceites remanentes en la zona del tapón hidráulico del SCPT con la concentración remanente en la zona ubicada sobre el geotextil o zona de descarga del SCPT (Ecuación 4.16). En la Figura 4.4 se muestra la ubicación de las zonas donde se extrajeron las muestras complementarias.

$$Ef_{A2} = 100 * \left[ 1 - \frac{C.A_{ZTH}}{CA_{ZSF}} \right] \quad \text{Ecuación 4.16}$$

Donde:

- $E_{f_{A2}}$  : Eficiencia de depuración de aceites comparando las concentraciones entre la zona de tapón hidráulico y zona sobre el sistema de filtrado del SCPT (%).
- $CA_{ZTH}$  : Concentración de aceites en la zona de tapón hidráulico del SCPT (mg/l).
- $CA_{ZSF}$  : Concentración de aceite en la zona sobre el sistema de filtrado del SCPT (mg/l).



Figura 4.4. Ubicación de las zonas de extracción de muestras complementarias de agua durante los Ensayo 2 y 3.

La Tabla 4.29 muestra los valores  $E_{f_{A2}}$  obtenidos para la carga alta y carga media.

Como se puede apreciar, estos valores son prácticamente iguales tanto si se comparan los distintos eventos como si se comparan las etapas.

La homogeneidad de los valores de  $Ef_{A2}$  concuerda y reafirma lo señalado anteriormente en relación a la falta de diferencias estadísticamente significativas entre  $Ef_A$  con carga alta y carga media.

Tabla 4.29. Valores de eficiencia de depuración de aceites en carga alta y carga media en la zona de tapón hidráulico y zona sobre sistema de filtrado.

Nº de evento	Carga Alta	Carga Media
1	99,1	99,2
6	-	99,0
9	99,0	-
11	99,1	99,1
14	99,2	99,4

El análisis de ajuste curvilíneo dio como resultado que la mejor curva de ajuste es una del tipo cuadrática (Ecuación 4.17), cuyos errores cumplen las hipótesis de normalidad, media e independencia. En el Gráfico 4.23 se muestran los valores medidos y la curva de ajuste.

$$EfA_{ENDE} = 99,218 - 0,072n + 0,006n^2 \quad \text{Ecuación 4.17}$$

Donde:

$EfA_{ENDE}$  : Eficiencia de depuración de aceites medida entre la zona de tapón hidráulico y la zona sobre el sistema de filtrado del SCPT (%).

n : Número de eventos consecutivos.

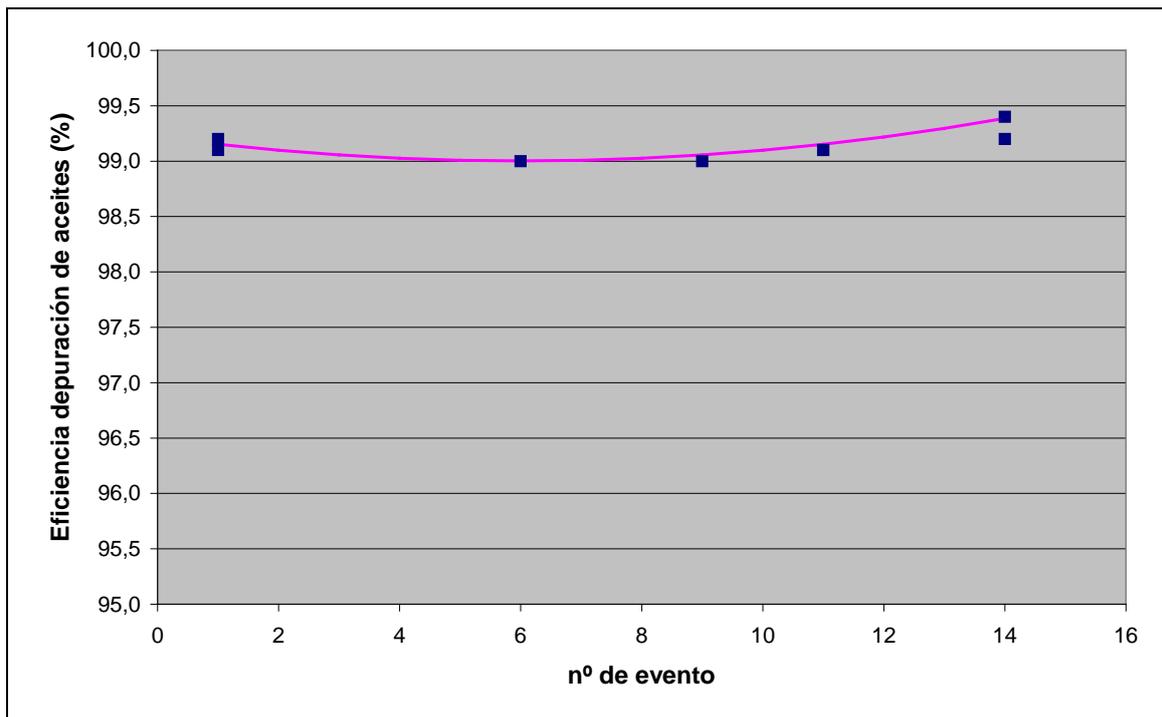


Gráfico 4.23. Valores y curva ajustada de la eficiencia de depuración de aceite en condiciones de carga alta y carga media en zona de tapón hidráulico y zona sobre el sistema de filtrado.

#### 4.5.3 Comparación de desnivel de agua en el Ensayo 2 y Ensayo 3.

Los valores de desnivel de las etapas con carga alta y carga media fueron analizados por medio de la prueba de Shapiro-Wilk (Shapiro y Wilk 1965) aplicada al conjunto de los datos, obteniéndose un p-valor de 0,024. Por lo que la muestra no es normal, siendo necesario realizar la transformación de los datos. Así, mediante una transformación de raíz cúbica se obtuvo para la misma prueba un p-valor de 0,093, consiguiéndose de esta forma la normalidad de la muestra.

Tras obtener la normalidad de los valores se procedió a realizar la Prueba T (Milton y Arnold 2003) que dio como resultado un p-valor de 0,972, con lo que se concluye que los valores de desnivel de superficie de agua no tienen una diferencia estadísticamente significativa entre las condiciones de carga alta y carga media.

Mediante un análisis de ajuste curvilíneo de los valores de desnivel se observa que existen varias posibles curvas de ajuste con niveles de confianza de 95 % ó superior y coeficientes de regresión superiores a 0,830 (Tabla 4.30 y definidas en el Anexo 1). Tal como se ha realizado anteriormente, se utilizó el criterio del coeficiente de regresión ajustado (Navidi 2006) obteniéndose la curva de tipo cúbica la que tiene mejor ajuste con un  $R^2$  ajustado de 0,876

Tabla 4.30. Posibles curvas de ajuste a los valores de desnivel en condiciones de carga alta y carga media.

Curva	$R^2$	$R^2$ ajustado	p-valor
Cúbica	0,893	0,876	0,000
Cuadrática	0,860	0,846	0,000
Lineal	0,836	0,828	0,000
Compuesta	0,830	0,821	0,000
Crecimiento	0,830	0,821	0,000
Exponencial	0,830	0,821	0,000

El análisis de los residuos dio como resultado que se verifican las hipótesis de normalidad, independencia y media cero establecidas para el ajuste curvilíneo de los resultados (Scheaffer y McClave 1995).

La Ecuación 4.18 y el Gráfico 4.24 representa el modelo de tipo cúbico adoptado.

$$H = 4,012 - 1,179n + 0,239n^2 - 0,0009n^3 \quad \text{Ecuación 4.18}$$

Donde:

- H : Diferencia de nivel de agua entre la zona de tapón hidráulico y zona sobre el sistema de filtrado del SCPT (mm)
- n : Número de eventos consecutivos.

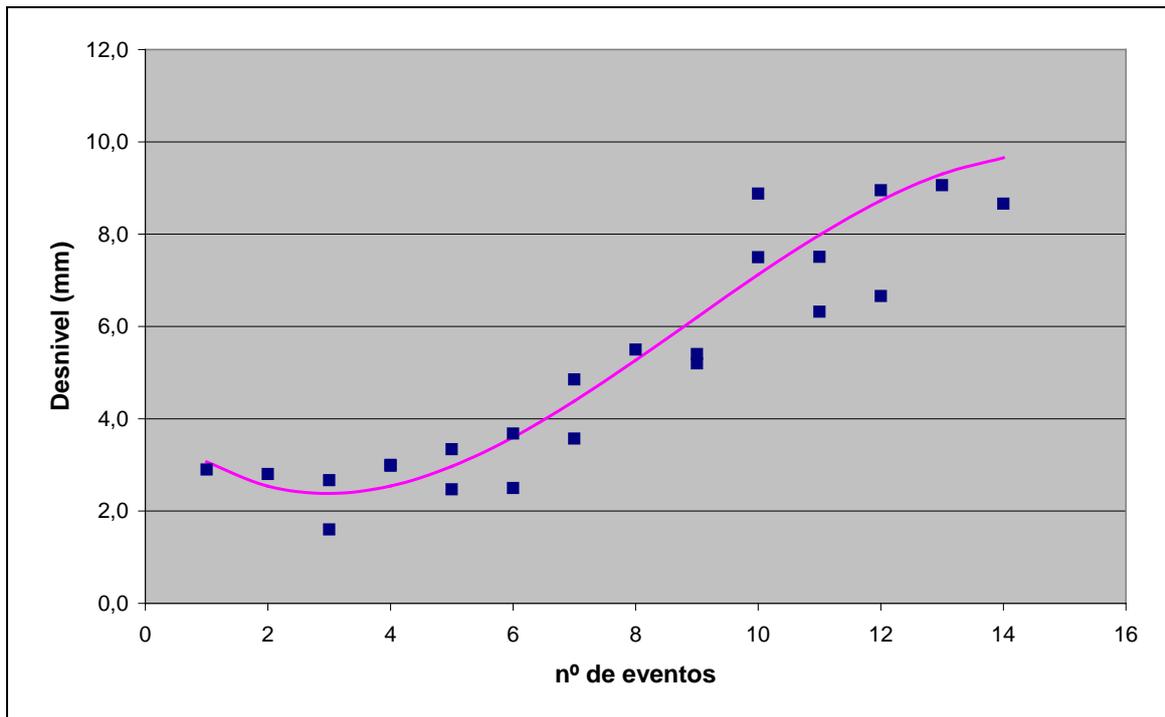


Gráfico 4.24. Valores del desnivel y la curva ajustada.

Este análisis conjunto muestra que existen tres fases en la diferencia de nivel entre la zona del tapón hidráulico y la zona de descarga. La primera es una disminución del desnivel, luego una fase creciente que abarca la mayor parte del tramo en estudio y finalmente un declive.

La primera fase puede deberse a un ajuste del sistema de filtrado correspondiente a la adaptación a la forma de las paredes del SCPT, que con el agua le permite un mejor amoldamiento. Así mismo, puede contribuir a este efecto de creación de “caminos preferentes de paso” a través de los poros del geotextil que facilitan el paso del agua a medida que se consolidan.

La segunda fase claramente corresponde al efecto de colmatación de los poros del geotextil por los sedimentos aportados por el caudal afluente, la resuspensión de los mismos que se encuentran dentro del SCPT y a las burbujas de aire atrapadas en el geotextil. A medida que se suceden los eventos, la colmatación va aumentando, dificultando de esta forma el paso

del agua y aumentando en consecuencia el desnivel de agua entre las dos zonas.

La tercera fase corresponde al momento en que se desplaza el sistema de filtrado, situación que favorece la aparición de espacios entre el sistema de filtrado y las paredes por donde el agua atraviesa con menor resistencia, perdiéndose la capacidad del desnivel para indicar el grado de colmatación.

#### 4.6 Resultados del Ensayo 4.

El análisis de la presencia y crecimiento de una colonia de microorganismos en el geotextil del sistema de filtrado del SCPT se realizó por medio de muestreo aleatorio simple (punto 3.6). El conteo de las unidades formadoras de colonias (UFC) por cada 1 ml se realizó mediante el método del número más probable (Most Probable Number, MPN (punto 3.2.4).

Los valores de MPN obtenidos para cada una de las secciones durante el las ocho semanas de estudio se presentan en la Tabla 4.31. La primera toma de muestras se realizó a los 14 días de iniciado el ensayo y la última a las ocho semanas. El crecimiento de las UFC en la octava semana resultó ser superior al máximo de la escala prevista, consecuentemente no se contabilizó en los análisis de este ensayo.

El error de medida debido a este tipo de muestreo para cada semana es menor al 5 % (Alba Fernández y Ruiz Fuentes 2006), valor que se considera aceptable para esta investigación.

La prueba de Shapiro-Wilk aplicada a los valores medios da un p-valor menor a 0,05, por lo que los valores medios MPN no son normales. Realizando una transformación logarítmica (Ln) a los valores, la prueba de Shapiro-Wilk señala la normalidad de ellos (p-valor de 0,184).

Tabla 4.31. Valores de MPN por semana medidos en el Ensayo 4.

Sección	Semana					
	2	3	4	5	6	7
1	3,90E+10	8,44E+11	3,46E+11	4,65E+13	1,02E+15	1,62E+12
2	2,45E+11	1,35E+12	8,43E+10	3,90E+12	1,20E+16	2,67E+11
3	2,45E+09	3,90E+10	1,06E+11	8,47E+12	1,56E+13	1,32E+17
4	2,45E+11	3,91E+09	3,69E12	5,87E+13	1,32E+15	3,06E+21
5	1,64E+10	1,63E+11	4,76E+15	1,87E+14	1,87E+13	1,93E+25
6	6,37E+09	8,61E+09	4,98E+15	3,83E+13	2,14E+19	1,35E+26
7	2,44E+10	1,32E+11	9,67E+15	3,90E+12	4,60E+13	1,35E+26
8	6,37E+10	6,82E+12	1,63E+11	1,32E+14	8,43E+15	1,20E+27
9	2,44E+10	1,06E+11	2,24E+16	2,26E+13	5,87E+22	1,20E+27
10	3,91E+09	8,44E+09	5,37E+13	2,44E+12	6,50E+24	1,58E+25
11	3,91E+11	1,98E+10	2,54E+15	3,42E+13	2,24E+18	7,80E+22
12	2,47E+10	2,26E+09	4,59E+17	8,43E+13	2,49E+13	1,68E+24
13	8,47E+12	1,08E+10	6,19E+16	9,67E+14	2,23E+15	2,34E+17
14	3,90E+10	8,47E+10	5,35E+13	1,01E+13	1,80E+14	1,32E+25
Media	6,85E+11	6,85E+11	4,04E+16	1,14E+14	4,68E+23	1,94E+26

Se sabe que el crecimiento sin limitaciones de una población microbiana tiene un comportamiento exponencial que es descrito por la Ecuación 4.19 (Atlas y Bartha 2002).

$$N_t = N_0 e^{rt} \quad \text{Ecuación 4.19}$$

Donde:

- $N_t$  : Densidad de la población tras cualquier período de tiempo t.
- $N_0$  : Densidad de la población inicial.
- r : tasa intrínseca de crecimiento.
- t : tiempo transcurrido.

Por tanto, los valores medios de MPN transformados logarítmicamente deberían ajustarse a una recta para cumplir con la ecuación que describe el crecimiento poblacional sin limitaciones de los microorganismos.

Igual que en casos anteriores se realizó la comprobación del cumplimiento de los supuestos necesarios para plantear modelos lineales. La prueba de Shapiro-Wilk realizada a los residuos señala que estos tienen una distribución normal (p-valor de 0,640). El contraste Durbin-Watson es de 2,563, comprobándose la hipótesis de independencia de los errores. Por su parte, la media de los residuos es cero. Además, el gráfico de residuos tipificados versus los valores ajustados no presenta tendencia, luego se cumple el supuesto de varianza constante (Gráfico 4.25)

La Ecuación 4.20 muestra la recta ajustada por medio de la regresión lineal aplicada a los valores medios de MPN.

$$\text{Ln}(MPN) = 8,875 + 6,922n$$

**Ecuación 4.20**

Donde:

Ln(MPN) : Logaritmo neperiano de MPN.

n : Número de semana.

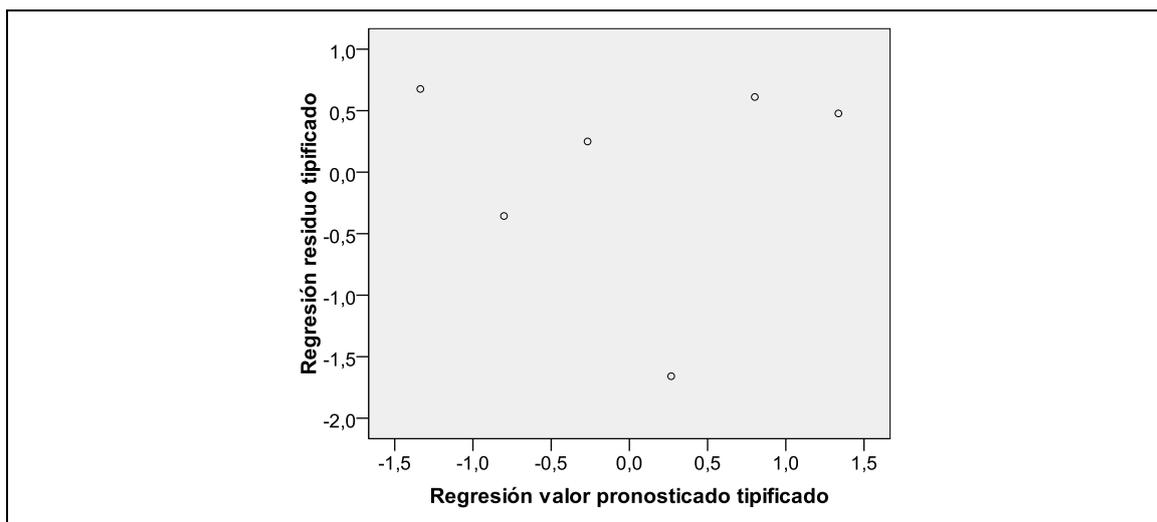


Gráfico 4.25. Relación de los residuos tipificados del modelo lineal frente a los valores pronosticados tipificados.

Transformando los datos a la forma primitiva se obtiene la Ecuación 4.21

$$MPN = 7.150 * e^{6,922n}$$

**Ecuación 4.21**

Se observa entonces que la Ecuación 4.21 tiene la misma forma que la Ecuación 4.19. Así, se obtiene que la densidad de población inicial es de 7.150 UFC/ml y la tasa intrínseca de crecimiento es 6,922. El Gráfico 4.26 muestra la Ecuación 4.21 y los valores medios correspondientes a los resultados de cada semana.

Estos resultados muestran la formación de una biopelícula en la capa de geotextil del sistema de filtrado del SCPT, cuyo crecimiento es exponencial. Este tipo de crecimiento es característico de poblaciones microbianas sin limitaciones de crecimiento, dentro de las que se puede contar la falta de fuentes de carbono y energía. Eso significa que el sistema de filtrado de SCPT cuenta con las fuentes de carbono necesarias para el desarrollo de la biopelícula.

Teniendo en cuenta que las colonias tuvieron como única fuente de carbono y energía el aceite usado de motor, se concluye que estas colonias son de microorganismos especializados en degradación de hidrocarburos.

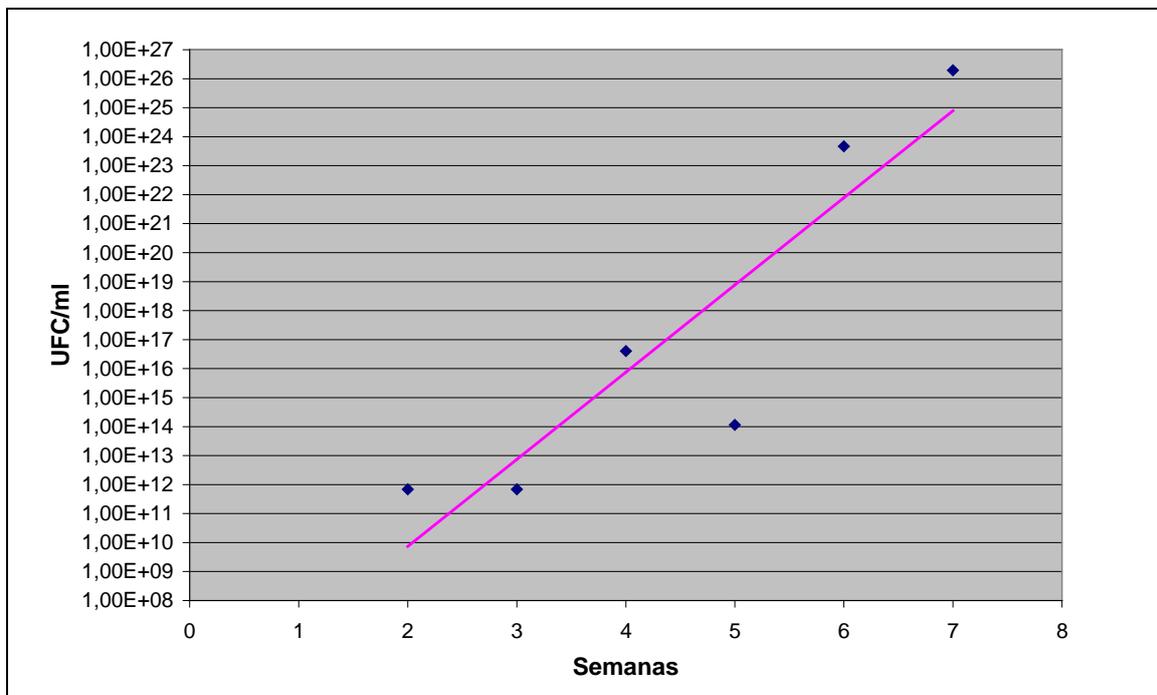


Gráfico 4.26. Densidad de población media de microorganismos por semana.



## 5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

### 5.1 Conclusiones generales.

La investigación realizada ha permitido conseguir un grado de consecución adecuado del objetivo propuesto. Este era diseñar y probar *un Sistema de Captación, Pretratamiento y Tratamiento in situ (SCPT) de las aguas de escorrentía superficial proveniente de aparcamientos con firmes impermeables.*

Así mismo, la investigación permitió determinar cuáles de los cinco factores estudiados (caudal afluente, largo del sistema de filtrado, número de capas de geotextil del sistema de filtrado y concentraciones de aceite y sólidos en el afluente) tienen influencia en el funcionamiento del prototipo del SCPT. El funcionamiento del SCPT se determinó mediante el análisis de cuatro variables, las capacidades de depuración de sólidos y aceites, y las concentraciones de estos mismos contaminantes en el efluente.

En esta investigación se demuestra que la variable concentración de aceites en el efluente no tiene relaciones estadísticamente significativas con ninguno de los cinco factores estudiados. Las demás variables analizadas sí tienen relaciones estadísticamente significativas con los factores estudiados, siendo ellas las que se describen a continuación.

El factor caudal afluente tiene una relación inversa con la variable eficiencia de depuración de sólidos y su influencia (coeficiente estandarizado -0,417) es similar al factor número de capas de geotextil en el sistema de filtrado (coeficiente estandarizado 0,597). Respecto de la variable carga contaminante de sólidos en el efluente, el factor caudal afluente tiene una relación directa y una influencia más bien baja comparada con la de los otros factores (coeficiente estandarizado 0,293). Finalmente, la relación entre la eficiencia de depuración de aceites y caudal afluente es de tipo inversa y con una influencia similar a los otros factores estudiados (0,428).

De los factores asociados al sistema de filtrado, el factor largo de este no presenta ninguna relación estadísticamente significativa con las variables estudiadas. Por su parte, el factor número de capas de geotextil tiene relación inversa con la concentración de sólidos en el efluente y su influencia (coeficiente estandarizado -0,285) es similar al caudal afluente (coeficiente estandarizado 0.293). Así mismo, existe una relación de tipo directa entre el número de capas de geotextil y la eficiencia de depuración de sólidos. Como en el caso anterior, esta influencia es similar al factor caudal afluente lo que se observa al comparar sus coeficientes estandarizados (0,597 y -0,417 respectivamente).

El factor concentración de sólidos en el afluente sólo tiene relación estadísticamente significativa con la variable concentración de sólidos en el efluente. La relación es de tipo directa y es la que mayor influencia tiene sobre esta variable (coeficiente estandarizado 0,834).

De forma análoga a la concentración de sólidos, el factor concentración de aceites en el afluente sólo tiene relación estadísticamente significativa con una variable analizada, que en este caso es la eficiencia de depuración de aceites. Esta relación también es de tipo directa y es el factor que más influencia tiene con esta variable (coeficiente estandarizado 0,603).

Las eficiencias de depuración de sedimentos del prototipo propuesto decaen a medida que transcurre el número de eventos. Además de la dependencia con el número de eventos, la depuración de sedimentos a largo plazo depende de la carga de sedimentos en el afluente. Esta dependencia no se aprecia en la depuración de los aceites.

En el estudio del comportamiento del prototipo de SCPT a largo plazo se constató que se produce una pérdida de capacidad hidráulica del sistema de filtrado por colmatación. Esta pérdida se refleja en el aumento progresivo de desnivel entre las superficies del agua a ambos lados de la pantalla. Esta colmatación se debe en gran medida a la absorción y retención de aire en el geotextil del sistema de filtrado.

La absorción de aire se produce como consecuencia del flujo de agua ascendente que desplaza, a manera de pistón, el aire que se encuentra bajo el sistema de filtrado, obligándolo a pasar a través del geotextil. El aire entonces queda retenido en el tejido del geotextil disminuyendo el diámetro efectivo de los poros, y de esta forma reduciendo su conductividad hidráulica.

Respecto a la capacidad de biodegradación de los aceites del SCPT, en el geotextil del sistema de filtrado se ha comprobado el desarrollado de una biopelícula de microorganismos degradadores de hidrocarburos. Las colonias de estos microorganismos tienen un crecimiento de tipo exponencial, característico de poblaciones microbianas sin limitaciones de crecimiento. Estas colonias se alimentan del aceite retenido en el sistema de filtrado, lo que produce un automantenimiento del mismo.

## 5.2 Conclusiones particulares.

Las conclusiones particulares que se desprenden de la investigación realizada son:

- ♦ El SCPT propuesto es capaz de tratar, como máximo, una lluvia con tiempo de concentración de 10 minutos y un periodo de retorno de 25 años, que cae sobre un aparcamiento impermeable de 200 m<sup>2</sup> ubicado en la ciudad de Santander.
- ♦ Los niveles de depuración del SCPT son superiores al 80 % en el caso de los sólidos y al 90 % en los aceites.
- ♦ Los factores que influyen en la eficiencia inicial de depuración de sólidos son: el caudal afluente y el número de capas de geotextil en el sistema de filtrado.
- ♦ Los factores que influyen en la eficiencia inicial de depuración de aceites son: el caudal afluente y la concentración de aceites en el afluente.

- ♦ El SCPT es capaz de mantener una eficiencia de depuración de sólidos y sólidos sobre el 90 % tras 14 eventos que simulan una lluvia de 2 años de periodo de retorno y 10 minutos de tiempo de concentración, sobre una superficie impermeable de 150 m<sup>2</sup>.
- ♦ Se ha probado que la concentración de sólidos en el afluente tiene una fuerte influencia en la eficiencia de su depuración a largo plazo del SCPT.
- ♦ La eficiencia de depuración de aceites parece estar fuertemente influenciada por la capacidad de retención de aceites de las caras interiores del SCPT.
- ♦ Los principales modelos del funcionamiento del SCPT se presentan en la Tabla 5.1. Estos modelos corresponden a la eficiencia de depuración inicial de sólidos (Ecuación 4.3), la eficiencia de depuración inicial de aceites (Ecuación 4.5), eficiencia a largo plazo de sólidos (Ecuación 4.7) con una concentración de sólidos en el afluente de 200 mg/l, y la eficiencia a largo plazo de depuración de aceites (Ecuación 4.11) con una concentración de aceite en el afluente de 20 mg/l.

Tabla 5.1. Principales modelos del funcionamiento del SCPT obtenidos a partir de la investigación realizada.

Ecuación	R <sup>2</sup>	Identificación
$Ef_S = 85,089 - 0,640Q + 2,284C.Fil$	0,531	<b>Ecuación 4.3</b>
$Ef_A = 93,801 + 0,0284Q + 0,098C.Ace$	0,547	<b>Ecuación 4.5</b>
$Ef_S = 86,956 + 1,960n - 0,112n^2$	1,000	<b>Ecuación 4.7</b>
$Ef_A = 98,053 - \frac{5,426}{n}$	0,872	<b>Ecuación 4.11</b>

- ♦ Se ha demostrado la presencia de comunidades microbianas degradadoras de hidrocarburos en el SCPT, localizadas en el geotextil del sistema de filtrado.
- ♦ Las comunidades microbianas degradadoras de hidrocarburos presentes en el geotextil del sistema de filtrado del SCPT tienen un crecimiento de tipo exponencial durante las ocho primeras semanas de funcionamiento.

### 5.3 Recomendaciones.

Los resultados analizados y las conclusiones expuestas en esta tesis doctoral se refieren a un prototipo de laboratorio escala 1:1 del SCPT. Esta investigación es por tanto un punto de partida para posteriores investigaciones sobre el sistema propuesto u otros similares operando en condiciones reales de trabajo.

Considerando los resultados obtenidos en laboratorio se puede hacer una serie de hipótesis y recomendaciones sobre el funcionamiento del sistema en condiciones reales de trabajo, como son:

- ♦ El SCPT es capaz alcanzar altos niveles de depuración con caudales máximos de 2,0 l/s. Esto implica que puede tratar las aguas de un parking con pavimento impermeable de 500 m<sup>2</sup> de superficie producto de una lluvia moderada (15 mm/h).
- ♦ Las dimensiones del SCPT propuesto son similares a una arqueta de registro clásica, lo que facilita integrar este sistema de depuración en el diseño de la red de drenaje del área a tratar.
- ♦ En caso de utilizar este sistema de depuración para superficies extensas de pavimento impermeable se puede hacer una división de la misma en cuencas más pequeñas.

- ♦ Dado el tamaño del SCPT propuesto es posible confeccionarlo como un sistema modular prefabricado que luego sea colocado en su ubicación final.

#### 5.4 Futuras líneas de investigación.

Las líneas de investigación futuras que se proponen se pueden clasificar en dos categorías: desarrollos en laboratorio y desarrollo en campo.

##### Desarrollo en laboratorio.

La investigación realizada en laboratorio con el prototipo de Sistema de Captación, Pretratamiento y Tratamiento in situ (SCPT) de aguas de escorrentía en aparcamientos, y que es presentada en esta tesis doctoral, puede ser ampliada en dos ámbitos principales.

El primero está relacionado con el efecto de retención de aire por el geotextil Polyfelt® TS 30 utilizado en el sistema de filtrado, proponiéndose las siguientes líneas de investigación:

- ❖ Estudio en otros geotextiles del grado de retención de aire y de la conductividad hidráulica a largo plazo. Este estudio consistiría en hacer un análisis como el descrito en el Ensayo 0 a una amplia gama de geotextiles que se encuentran actualmente en el mercado. Una vez determinado cuáles son los más aptos, se ensayarían en el prototipo existente de SCPT según la metodología de los ensayos 2 y 3, comparando sus resultados con los descritos en esta tesis doctoral.
- ❖ Estudio de aditivos para los geotextiles que eviten o disminuyan en forma significativa la retención de burbujas de aire. De igual forma que en el punto anterior, este estudio puede utilizar la metodología del Ensayo 0 o una modificación de ésta si fuera necesario. A continuación se probaría el geotextil con aditivo en el SCPT según la metodología de los ensayos 2 y 3, comparando sus resultados con los descritos en esta tesis doctoral.

- ❖ Desarrollo de un nuevo geotextil diseñado especialmente para mejorar las prestaciones del sistema de filtrado del SCPT. Este desarrollo puede implicar la búsqueda de nuevos materiales o un nuevo método de confección del geotextil que asegure una mayor conductividad hidráulica en el largo plazo y el desarrollo adecuado de la biopelícula degradadota de aceites. Este nuevo geotextil sería ensayado según las metodologías de los ensayos 0; 2; 3 y 4 descritos en esta tesis doctoral.

El segundo ámbito corresponde al estudio de la influencia de otras características del SCPT no estudiadas en esta tesis doctoral. Se proponen los siguientes estudios a partir del prototipo de SCPT desarrollado:

- ❖ Tipos de materiales utilizados para construir la estructura del SCPT. Esta investigación tendría como objeto determinar los efectos de la rugosidad sobre las eficiencias del SCPT, en forma especial sobre la retención de aceite por las caras internas de las paredes del SCPT.
- ❖ Desarrollo de un modelo matemático de simulación del funcionamiento y respuestas del SCPT, basado en los resultados de esta investigación. Este desarrollo tendría por objetivo estudiar los efectos de las modificaciones geométricas del SCPT sobre las eficiencias de depuración de los contaminantes.

### **Desarrollo en campo.**

El prototipo de SCPT presentado en esta tesis corresponde a un prototipo de laboratorio. Como se ha probado su eficiencia en condiciones controladas, se proponen los siguientes estudios en campo o condiciones reales de utilización:

- ❖ Construir e instrumentalizar un SCPT en un aparcamiento con superficie impermeable con la configuración utilizada en los ensayos 2 y 3. El SCPT debería contar con un sistema que asegure una toma de muestras separadas durante toda la duración de los eventos de lluvia, como su conservación. El periodo de monitorización debería ser de un mínimo de 3 años. Además de analizar las muestras para contenido de sólidos y aceites, se puede analizar también otros contaminantes como metales pesados, demanda química de oxígeno, pH ó coliformes.

- ❖ Realizar un estudio de la influencia de las características del SCPT, de forma similar al Ensayo 1 descrito en esta tesis doctoral.
- ❖ Desarrollar un diseño de SCPT modular prefabricado. En este desarrollo pueden investigarse diversos materiales para la estructura del SCPT como pueden ser hormigón armado o fibra de vidrio.

## Referencias.

- Alba Fernández, M. V., y Ruiz Fuentes, N. (2006). *Muestreo Estadístico en Poblaciones Finitas*. Septem Ediciones, España.
- Altamirano, M. G., y Pozzo Ardizzi, M. G. (2000). "Aislamiento e identificación de bacterias hidrocarburofílicas provenientes de un suelo sometido a biorremediación." *XXVII Congresso Interamericano de Engenharia Sanitária e Ambiental*.
- American Public Health Association, American Water Works Association, and Water Environmental Federation. (2005). *Standard methods for the examination of water y wastewater*. Centennial Edition, U.S.A.
- Åstebøl, S. O., Hvitved-Jacobsen, T., y Simonsen, Ø. (2004). "Sustainable stormwater management at Fornebu - From an airport to an industrial and residential area of the city of Oslo, Norway." *Sci.Total Environ.*, 334-335 239-249.
- Atlas, R. M., y Bartha, R. (2002). *Ecología microbiana y microbiología ambiental*. PEARSON EDUCACIÓN, Madrid. España.
- Barbosa, A. E., y Hvitved-Jacobsen, T. (1999). "Highway runoff and potential for removal of heavy metals in an infiltration pond in Portugal." *Sci. Total Environ.*, 235(1-3), 151-159.
- Barrett, M. E., Irish, L. B., Jr., Malina, J. F., Jr., y Charbeneau, R. J. (1998a). "Characterization of highway runoff in Austin, Texas, Area." *Journal of Environmental Engineering*, 124(2), 131-137.
- Barrett, M. E., Walsh, P. M., Malina J. F., Jr., y Charbeneau, R. J. (1998b). "Performance of vegetative controls for treating highway runoff." *J. Environ. Eng.*, 124(11), 1121-1128.
- Begum, S., Rasul, M. G., y Brown, R. J. (2008). "A comparative review of stormwater treatment and reuse techniques with a new approach: Green Gully." *WSEAS Trans. Environ. Dev.*, 4(11), 1002-1013.
- Behera, P. K., Adams, B. J., y Li, J. Y. (2006). "Runoff quality analysis of urban catchments with analytical probabilistic models." *J. Water Resour. Plann. Manage.*, 132(1), 4-14.
- Booth, D. B. (2003). "Long-term stormwater quantity y quality performance of permeable pavement systems." *Water Research*, 37 4369-4376.

- Boving, T. B., y Neary, K. (2006a). "Attenuation of polycyclic aromatic hydrocarbons from urban stormwater runoff by wood filters." *Journal of Contaminant Hydrology*, doi:10.1016/j.jconhyd.2006.08.009.
- Boving, T. B., y Neary, K. (2006b). "Testing the efficiency of a stormwater runoff treatment structure with anthropogenic treacers." *Environmental & Engineering Geoscience*, 12(2), 115-124.
- Box, G. E. P., Hunter, W. G., y Hunter, J. S. (2005). *Estadística para investigadores. Introducción al diseño de experimentos, análisis de datos y construcción de modelos*. Reverté Ediciones, S.A de C.V., Mexico.
- Brown, J. N., y Peake, B. M. (2006). "Sources of heavy metals and polycyclic aromatic hydrocarbons in urban stormwater runoff." *Science of the Total Environment*, 359 145-155.
- Bulbeck Envirosolutions. (2009). <http://www.industrysearch.com.au/Suppliers/Bulbeck-Envirosolutions> (11/13, 2009).
- CALTRANS. (2007). "Treatment BMP Technology Report." *Rep. No. Final*, California Department of Transportation, Division of Environmental Analysis, Sacramento, California.
- Castillo Ron, E., y Pruneda, R. E. (2001). *Estadística aplicada*. Moralea, Albacete.
- Castro Fresno, D., y Ballester Muñoz, F. (2006). "Sostenibilidad aplicada al drenaje urbano." .
- Castro Fresno, D., Bayón, J. R., Rodríguez, J., y Ballester, F. (2005). "Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS)." Vol. 30 (No. 5), pp. 255-260.
- Castro Fresno, D., Rodríguez Hernández, J., y Rodríguez Bayón, J. (2006). "“Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible”." *XXXIII Congreso Nacional de Parques y Jardines Públicos (PARJAP 2006) Una nueva sociedad, un nuevo paisaje. Santander, Junio*.
- Characklis, G. W., y Wiesner, M. R. (1997). "Particles, metals, and water quality in runoff from large urban watershed." *Journal of Environmental Engineering*, 123(8), 753-759.
- Charbeneau, R. J., y Barrett, M. E. (1998). "Evaluation of methods for estimating stormwater pollutant loads." *Water Environmental Research*, 70(7), 1295-1302.
- Coupe, S. J., Smith, H. G., Lowe, T., y Robinson, K. (2006). "A COMPARISON OF THE EFFECT OF CLEAN AND WASTE MINERAL OILS ON PERMEABLE PAVEMENTS".

*8th International Conference on Concrete Block Paving, November 6-8, 2006. San Francisco, California USA, 203-212.*

- Crabtree, B., Moy, F., Whitehead, M., y Reo, A. (2006). "Monitoring pollutants in highway runoff." *Water and Environment Journal.*, 20 287-294.
- Dean, C. M., Sansalone, J. J., Cartledge, F. K., y Pardue, J. H. (2005). "Influence of hydrology on rainfall-runoff metal element speciation." *J. Environ. Eng.*, 131(4), 632-642.
- Efremenko, E. N., Azizov, R. E., Raeva, A. A., Abbasov, V. M., y Varfolomeyev, S. D. (2005). "An approach to the rapid control of oil spill bioremediation by bioluminescent method of intracellular ATP determination." *Int.Biodeterior.Biodegrad.*, 56(2), 94-100.
- Faram, M. G. (2000). "Removal of sediments y oils from urban run-off using the Downstream Defender." .
- Flint, K. R., y Davis, A. P. (2007). "Pollutant mass flushing characterization of highway stormwater runoff from an ultra-urban area." *J. Environ. Eng.*, 133(6), 616-626.
- Fulkerson, M., Nnadi, F. N., y Chasar, L. S. (2007). "Characterizing dry deposition of mercury in urban runoff." *Water Air Soil Pollut.*, 185(1-4), 21-32.
- Gan, H., Zhuo, M., Li, D., y Zhou, Y. (2008). "Quality characterization and impact assessment of highway runoff in urban y rural area of Guangzhou, China." *Environ. Monit. Assess.*, 140(1-3), 147-159.
- Gnecco, I., Berretta, C., Lanza, L. G., y La Barbera, P. (2005). "Storm water pollution in the urban environment of Genoa, Italy." *Atmos. Res.*, 77(1-4 SPEC. ISS.), 60-73.
- Göbel, P., Dierkes, C., y Coldewey, W. G. (2006). "Storm water runoff concentration matrix for urban areas." *Journal of Contaminant Hydrology*, doi:10.1016/j.jconhyd.2006.08.008.
- Hallberg, M., y Renman, G. (2006). "Assessment of suspended solids concentration in highway runoff and its treatment implication." *Environ. Technol.*, 27(9), 945-950.
- Hallberg, M., Renman, G., y Lundbom, T. (2007). "Seasonal variations of ten metals in highway runoff and their partition between dissolved and particulate matter." *Water Air Soil Pollut.*, 181(1-4), 183-191.
- Han, Y. H., Lau, S. L., Kayhanian, M., y Stenstrom, M. K. (2006). "Correlation analysis among highway stormwater pollutants and characteristics." *Water Sci. Technol.*, 53(2), 235-243.

- Hanson Formpave. "Hanson Fompave Inbitex Thermally Bonded Nonwoven Geotextile." <http://www.geotechnics-uk.com/sites/geotechnics-uk.com/files/Inbitex%20Data%20Sheet.pdf> (11/19, 2009).
- Hewitt, C. N., y Rashed, M. B. (1992). "Removal rates of selected pollutants in the runoff waters from a major rural highway." *WATER RES.*, 26(3), 311-319.
- Heyvaert, A. C., Reuter, J. E., y Goldman, C. R. (2006). "Subalpine, cold climate, stormwater treatment with a constructed surface flow wetland." *J. Am. Water Resour. Assoc.*, 42(1), 45-54.
- Hossain, M. A., Alam, M., Yonge, D. R., y Dutta, P. (2005). "Efficiency and flow regime of a highway stormwater detention pond in Washington, USA." *Water Air Soil Pollut.*, 164(1-4), 79-89.
- Huang, L., Boving, T. B., y Xing, B. (2006). "Sorption of PAHs by Aspen Wood Fibers as Affected by Chemical Alterations." *ENVIRONMENTAL SCIENCE & TECHNOLOGY*, 40(10), 3279-3284.
- Huang, J., Du, P., Ao, C., Ho, M., Lei, M., Zhao, D., y Wang, Z. (2007). "Multivariate analysis for stormwater quality characteristics identification from different urban surface types in Macau." *Bull. Environ. Contam. Toxicol.*, 79(6), 650-654.
- Hydro International. (2009). <http://www.hydro-international.biz/stormwater/downstream.php> (11/13, 2009).
- Irish, L. B., Jr., Barrett, M. E., Malina, J. F., Jr., y Charbeneau, R. J. (1998). "Use of regression models for analyzing highway storm-water loads." *Journal of Environmental Engineering*, 124(10), 987-993.
- Jiménez Gallardo, B. R. (1999). *Contaminación por Escorrentía Urbana*. Madrid: Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos; Colección SEINOR No. 22; ISBN: 84-380-0157-2.
- Johnsen, A. R., Bendixen, K., y Karlson, U. (2002). "Detection of microbial growth on PAHs in microtiter plates using the respiration indicator WST-1." *Appl. Environ. Microbiol.*, 68 3487-3491.
- Jones, J. E., Earles, T. A., Fassman, E. A., Herricks, E. E., Urbonas, B., y Clary, J. K. (2005). "Urban Storm-Water Regulations—Are Impervious Area Limits a Good Idea?" *JOURNAL OF ENVIRONMENTAL ENGINEERING*, Febrero (Editorial), 176-179.
- Kayahanian, M., Suverkropp, C., Ruby, A., y Tsay, K. (2007). "Characterization and prediction of highway runoff constituent event mean concentration." *Journal of Environmental Management*, doi:10.1016/j.jenvman.2006.09.024.

- Khan, S., Lau, S., Kayhanian, M., y Stenstrom, M. K. (2006). "Oil y Grease Measurement in Highway Runoff—Sampling, Time and Event Mean Concentrations." *JOURNAL OF ENVIRONMENTAL ENGINEERING*, 132(3), 415-422.
- Kim, L., Ko, S., Jeong, S., y Yoon, J. (2007). "Characteristics of washed-off pollutants and dynamic EMCs in parking lots and bridges during a storm." *Sci. Total Environ.*, 376(1-3), 178-184.
- Lau, S., Ma, J., Kayhanian, M., y Stenstrom, M. K. (2002). "First flush of organics in highway runoff." *Proceedings of the Ninth International Conference on: Urban Drainage*, 1-12.
- Lee, B. C., Matsui, S., Shimizu, Y., y Matsuda, T. (2005). "Characterizations of the first flush in storm water runoff from an urban roadway." *Environ. Technol.*, 26(7), 773-782.
- Lee, J. H., y Bang, K. W. (2000). "CHARACTERIZATION OF URBAN STORMWATER RUNOFF." *Water Research*, 34(6), 1773-1780.
- Lee, J. H., Bang, K. W., Ketchum, L. H., Choe, J. S., y Yu, M. J. (2002). "First flush analysis of urban storm runoff." *The Science of the Total Environment*, 293 163-175.
- Legret, M., y Colandini, V. (1999). "Effects of a porous pavement with reservoir structure on runoff water: water quality and fate of heavy metals." *Water Science and Technology*, 39(2), 111.
- Li, M. -, Barrett, M. E., Rammohan, P., Olivera, F., y Landphair, H. C. (2008). "Documenting stormwater quality on Texas highways and adjacent vegetated roadsides." *J. Environ. Eng.*, 134(1), 48-59.
- Lundberg, K., Carling, M., y Lindmark, P. (1999). "Treatment of highway runoff: A study of three detention ponds." *Sci.Total Environ.*, 235(1-3), 363-365.
- Mahler, B. J., Van Metre, P. C., Bashara, T. J., Wilson, J. T., y Johns, D. A. (2005). "Parking lot sealcoat: An unrecognized source of urban polycyclic aromatic hydrocarbons." *Enviro. Sci. Technol.*, 39(15), 5560-5566.
- Marsalek, J., Brownlee, B., Mayer, T., Lawal, S., y Larkin, G. A. (1997). "Heavy metals and PAHs in Stormwater Runoff from the Skyway Bridge, Burlington, Ontario." *Water Qual. Res. J. can.*, 32(4), 815-827.
- Marsalek, J. (1991). "Pollutant loads in urban stormwater: Review of methods for planning-level estimates." *Water Resources Bulletin*, 27(2), 283-291.

- Massol, A. (2009). "Manual de biología microbiana." <http://www.uprm.edu/biology/profs/massol/manual/> (05/08, 2009).
- Milton, J. S., y Arnold, J. C. (2003). *Probabilidad y estadística con aplicaciones para ingeniería y ciencias computacionales*. McGraw-Hill Interamericana, cop., Mexico.
- Mitchell, G. (2005). "Mapping hazard from urban non-point pollution: A screening model to support sustainable urban drainage planning." *J. Environ. Manage.*, 74(1), 1-9.
- Navidi, W. (2006). *Estadística para ingenieros y científicos*. McGraw-Hill Interamericana, México.
- Perales Momparler, S., y Andrés-Doménech, I. (2008). "Los sistemas urbanos de drenaje sostenible: una alternativa a la gestión del agua lluvia." *Retama*, 124 92-104.
- Permavoid Limited. (2006). <http://www.permavoid.co.uk/html/permachannel.html> (11/13, 2009).
- Pettersson, T. J. R., German, J., y Svensson, G. (1999). "Pollutant removal efficiency in two stormwater ponds in Sweden." PhD thesis, Chalmers Tekniska Hogskola, Goteborg, Sweden.
- Polyfelt Gruppe. (2005). "Technical Data polyfelt.TS." [http://www.liningproducts.co.uk/item\\_info/FLP%20Polyfelt%20Tech%20Spec.pdf](http://www.liningproducts.co.uk/item_info/FLP%20Polyfelt%20Tech%20Spec.pdf) (11/19, 2009).
- , F. F., y Grassi, M. T. (2006). "Copper, lead and cadmium loads and behavior in urban stormwater runoff in Curitiba, Brazil." *J. Braz. Chem. Soc.*, 17(1), 53-60.
- PROPEX Fabrics. (2004). "Technical Data Amoco Fabrics AmoPave." <http://www.geotextile.com/europe/products/Data-Sheet-Amopave-E.PDF> (12/19, 2009).
- Rodríguez Bayón, J. (2008). "Análisis de los aspectos de depuración y degradación de los hidrocarburos presentes en las aguas prodecentes de la escorrentía urbana, en los firmes permeables." PhD thesis, Universidad de Cantabria, Santander.
- Rodríguez Hernández, J. (2008). "Estudio, análisis y diseño de secciones permeables de firmes para vías urbanas con un comportamiento adecuado frente a la colmatación y con la capacidad portante necesaria para soportar tráfico ligero." PhD thesis, Universidad de Cantabria, Santander.

- Sansalone, J. J., y Buchberger, S. G. (1997a). "Effective control strategies for highway nonpoint pollutio." *CEDEX (D1 NTIS 50A, PB99109746XSP)*..
- Sansalone, J. J., y Buchberger, S. G. (1997b). "Partitioning and first flush of metals in urban roadway strom water." *Journal of Environmental Engineering*, 123(2), 134-135.
- Sansalone, J. J., Koran, J. M., Smithson, J. A., y Buchberger, S. G. (1998). "Physical characteristics of urban roadway solids transported during rain events." *Journal of Environmental Engineering*, 124(5), 427-440.
- Scheaffer, R. L., y McClave, J. T. (1995). *Probability and Statistics for Engineers*. International Thompson Publishing, USA.
- Scholz, M., y Grabowiecki, P. (2007). "Review of permeable pavement systems." *Building y Environment*, 42(11), 3830-3836.
- Shapiro, S. S., y Wilk, M. B. (1965). "An analysis of variance test for normality (complete samples)." *Biometrika*, 52(3-4), 591-611.
- Soller, J., Stephenson, J., Olivieri, K., Downing, J., y Olivieri, A. W. (2005). "Evaluation of seasonal scale first flush pollutant loading and implications for urban runoff management." *Journal of Environmental Management*, 76 309-318.
- Stotz, G., y Krauth, K. (1994). "The pollution of effluents from pervious pavements of an experimental highway section: first results." Vol. 146-147 pp. 465-470.
- Suntree Technologies. (2009) "Stormwater Solutions Specialists." <http://www.suntreetech.com/Products/Grate+Inlet+Skimmer+Box/default.aspx> (11/13, 2009).
- Taebi, A., y Droste, R. L. (2004). "Pollution loads in urban runoff and sanitary wastewater." *Science of the Total Environment*, 327 175-184.
- Thomson, N. R., Mcbean, E. A., Snodgrass, W., y Monstrenko, I. B. (1997). "Highway stormwater runoff quality: Development of surrogate parameter relationships." *WATER AIR SOIL POLLUT.*, 94(3-4), 307-347.
- Tuccillo, M. E. (2006). "Size fractionation of metals in runoff from residential and highway storm sewers." *Science of the Total Environment*, 355 288-300.
- Vaze, J., y Chiew, F. H. S. (2004). "Nutrient loads associated with different sediment sizes in urban stormwater y surface pollutants." *J. Environ. Eng.*, 130(4), 391-396.
- Viñas Canals, M. (2005). "Biorremediación de suelos contaminados por hidrocarburos: caracterización microbiológica, química y ecotoxicológica." PhD thesis, Universitat de Barcelona, Barcelona, España.

- Wrenn, B. A., y Venosa, A. D. (1996). "Selective enumeration of aromatic and aliphatic hydrocarbon degrading bacteria by a most-probable-number procedure." *Can.J.Microbiol.*, 42(3), 252-258.
- Wu, S., Allan, C. J., Saunders, W. L., y Evett, J. B. (1998). "Characterization and pollutant loading estimation for highway runoff." *Journal of Environmental Engineering*, 124(7), 584-592.
- Zafra Mejía, C. A., y Temprano González, J. (2005). "Análisis granulométrico y contenido de metales pesados en los sedimentos acumulados sobre una vía urbana." PhD thesis, Universidad de Cantabria, ESPAÑA.
- Zhang, W., Zhang, S., Yue, D., Wan, C., Ye, Y., y Wang, X. (2008). "Characterization y loading estimation of polycyclic aromatic hydrocarbons in road runoff from urban regions of Beijing, China." *Environ. Toxicol. Chem.*, 27(1), 31-37.

## **ANEXO I**

### **TIPOS DE CURVAS UTILIZADAS EN LAS ESTIMACIONES CURVILÍNEAS**



Los modelos de estimación curvilínea utilizados en esta tesis quedan recogidos en la Tabla I.1, donde los valores  $\beta_i$  son coeficientes y  $t$  es la variable predictora.

Tabla I.1. Modelos de estimación curvilínea.

Modelo	Ecuación
Lineal	$y = \beta_0 + \beta_1 * t$
Logarítmico	$y = \beta_0 + \beta_1 * \ln(t)$
Inverso	$y = \beta_0 + \frac{\beta_1}{t}$
Cuadrático	$y = \beta_0 + \beta_1 * t + \beta_2 * t^2$
Cúbico	$y = \beta_0 + \beta_1 * t + \beta_2 * t^2 + \beta_3 * t^3$
Potencia	$y = \beta_0 * t^{\beta_1}$ $\ln(y) = \ln(\beta_0) + \beta_1 * \ln(t)$
Compuesto	$y = \beta_0 * \beta_1^t$ $\ln(y) = \ln(\beta_0) + \ln(\beta_1) * t$
Curva S	$y = e^{\beta_0 + \frac{\beta_1}{t}}$ $\ln(y) = \beta_0 + \frac{\beta_1}{t}$
Crecimiento	$y = e^{\beta_0 + \beta_1 * t}$ $\ln(y) = \beta_0 + \beta_1 * t$



**ANEXO II**  
**CARACTERÍSTICAS DE**  
**LOS GEOTEXTILES UTILIZADOS EN**  
**LA INVESTIGACIÓN**





## Technical Data Amoco Fabrics AmoPave®

Amoco Fabrics AmoPave®				
Test Method	Standard	Unit	4595	
			MD	CD
Mass per Unit Area $M_A$	EN 965	g/m <sup>2</sup>	120	
Thickness (2kN/m <sup>2</sup> ) $d$	EN 964/1	mm	1,0	
Tensile Strength $T_{max}$	EN ISO 10 319	kN/m	8	8
Tensile Force at 5 % Strain $T_{\epsilon}$		kN/m		
Strain at max. Load $\epsilon$		%	50	50
Mullen Burst	ASTM D 3786	kPa	1200	
Pressure				
Water Permeability	EN ISO 11 058	mm/s	90	
normal to plane $V_{H50}$				
Characteristic Opening Size	EN ISO 12 956	µm	100	
$O_{90}$ (wet sieving)				
Asphalt Retention	ASTM D 6140	l/m <sup>2</sup>	0,90	
UV-Resistance strength retained after 50 MJ/m <sup>2</sup>	ASTM D 43465	%	70%	
<b>Packing</b>				
Fabric width		cm	380	
Roll length		m	110	
Roll diameter		cm	35	
Total weight		kg	68	
Area		m <sup>2</sup>	418	

\* All our data's are average values

\* Specific weight of Polypropylene : 0.90 g/cm<sup>3</sup>, Melting Point: approx. 149 °C

### Exclusion of Liability

Information contained in this publication is accurate to the best of the knowledge of PROPEX FABRICS. Any information or advice obtained from PROPEX FABRICS otherwise than by means of this publication and whether relating to PROPEX FABRICS materials or other materials, is also given in good faith. However, it remains at all times, the responsibility of the customer to ensure that PROPEX FABRICS materials are suitable for the particular purpose intended. Insofar as materials not manufactured or supplied by PROPEX FABRICS are used in conjunction with or instead of PROPEX FABRICS materials, the customer should ensure that he has received from the manufacturer or supplier all the technical data and other information relating to such materials. PROPEX FABRICS accepts no liability whatsoever (except as otherwise expressly provided by law) arising out of the use of information supplied, the application or processing of the products described herein, the use of other materials in lieu of PROPEX FABRICS materials in conjunction with such other materials.

Last Change  
24.11.2004

PROPEX Fabrics  
Düppelstraße 16  
48599 Gronau (Germany)

Print Date  
31.01.2005



### TS - Separation & Filtration Nonwovens - Technical Data

Properties (Standard)	Unit	TS 10 (4.01)	TS 20 (4.01)	TS 30 (4.01)	TS 40	TS 50	TS 60	TS 65	TS 70	TS 80	
<b>Mechanical Properties</b>											
Tensile strength (EN ISO 10318)	MD	kN/m	7.5	9.5	11.5	13.5	15.0	20.0	21.5	24.0	28.0
	CD	kN/m	7.5	9.5	11.5	13.5	15.0	20.0	21.5	24.0	28.0
Elongation at max. load (EN ISO 10318)	MD	%	90	90	90	100	100	100	100	100	100
	CD	%	75	75	75	40	40	40	40	40	40
Static puncture resistance (CBR-Test) (EN ISO 12236)		N	1200	1500	1750	2100	2350	2900	3300	3850	4250
Cone drop test (hole-Ø) (EN ISO 12433)		mm	28	24	20	25	22	19	17	15	14
<b>Hydraulic Properties</b>											
Permeability vertical (EN ISO 11058) (Δh = 50 mm)		l/m <sup>2</sup> (mm/s)	130	115	100	100	90	80	70	60	55
Opening size O <sub>90</sub> (EN ISO 12956)		µm	105	105	100	100	100	95	95	90	90
<b>Identification Properties</b>											
Thickness (EN ISO 9893-1)	2 kPa	mm	0.8	0.9	1.2	1.7	1.9	2.2	2.5	2.9	3.2
Mass per unit area (EN ISO 9894)		g/m <sup>2</sup>	105	125	155	180	200	260	285	325	385
<b>Forms of Supply</b>											
Width		m	2 / 4	2 / 4	2 / 4	2 / 4	2 / 4	2 / 4	2 / 4	2 / 4	2 / 4
Length		m	300	250	225	200	175	135	125	100	90

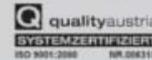
The values given are average values obtained in our laboratories and in testing institutes. The right is reserved to make changes without notice at any time.

**TENCATE GEOSYNTHETICS AUSTRIA GMBH**

Schobermayergasse 18 Tel. +43 732 8983 0, Fax +43 732 8983 5353  
A 4021 Linz, Austria service.a@tencate.com, www.tencate.com/geosynthetic

**Belarus** Tel. +31 546 544 911 service.rs@tencate.com  
**Central Eastern Europe** Tel. +43 732 8983 9 service.ce@tencate.com  
**Czech Republic** Tel. +420 2 2425 1943 service.cz@tencate.com  
**France / Africa** Tel. +33 1 34 23 83 83 service.fr@tencate.com  
**Germany** Tel. +49 89 74 3791 50 service.de@tencate.com  
**Italy** Tel. +39 0362 34 58 11 service.it@tencate.com  
**Near Middle East** Tel. +971 5042 10657 service.nme@tencate.com

**Poland** Tel. +48 17 268 8376 service.pl@tencate.com  
**Russia** Tel. +46 21 322 38 88 service.ru@tencate.com  
**Russia / CIS** Tel. +7 393 412 7887 service.ru@tencate.com  
**Scandinavia / Baltics** Tel. +46 4485 7474 service.se@tencate.com  
**Spain / Portugal** Tel. +34 91 950 9491 service.es@tencate.com  
**Switzerland** Tel. +41 44 318 8500 service.ch@tencate.com  
**UK / Ireland** Tel. +44 1952 588 066 service.uk@tencate.com



ISO 9001:2008  
ISO 14001:2004

## Hanson Formpave Inbitex® Thermally Bonded Nonwoven Geotextile

### Inbitex

Product Grades		Inbitex	
<b>Mechanical properties</b>			
Wide width strip tensile	EN ISO 10319		
- Mean peak strength		kN/m	8.50
- Elongation at peak strength		%	28
CBR puncture resistance	EN ISO 12236		
- Mean peak strength		N	1575
Trapezoidal tear resistance	ASTM D4533		
- Mean peak strength		N	325
<b>Hydraulic properties</b>			
Pore size	EN ISO 12956		
- Mean AOS D90		mm	0.145
Water flow	EN ISO 11058		
- Mean flow V/H50		l0.3m.s-1(l/m2.s)	80
Water breakthrough	BS 6906 Part 3		
- Main head		mm	50
Air permeability	ISO 9237		
- Mean flow		l/m2.s	2875
<b>Physical properties - typical</b>			
Mass	EN 965	g/m2	130
Roll width		m	4.5 & 1.5
Roll length		m	100

The Inbitex® geotextile is unique. The fabric is manufactured from polypropylene and polyethylene. During the manufacturing process, small dishes are created on the surface of the hairs from which the geotextile is manufactured. This is very important in the early establishment of a microbial biomass which is responsible for eating and degrading oils in the water. It is also important during dry

periods when the microbial population can retreat into the dishes where moisture is to be found. Thus when it rains again the microbial biomass is quickly re-established. What about the use of de-icing salts: won't the salt kill the microbes? Well yes and no - a large proportion of the microbes will be killed, but those which survive develop an immunity to salt and a salt-resistant community develops.

## Hanson Formpave - SC Intergrid®

### Hanson Formpave - SC Intergrid®

SC Intergrid	
Polymer	Polypropylene
Minimum carbon black content	2%
Weight (kg/m <sup>2</sup> )	0.3
Roll dimensions	50m x 4m

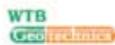
1. The reinforcing element shall be manufactured in accordance with the Quality Assurance requirements ISO 9002. If required by the Engineer, the Contractor shall provide evidence that the manufacturer's Quality Assurance System has been certified to conform with ISO 9002 by an external authenticating authority approved by the Department of Trade and Industry.
2. The reinforcing element shall be a geogrid manufactured from polypropylene sheet, oriented in two directions so that the resulting ribs shall have a high degree of molecular orientation which continues through the area of the integral node.
3. The geogrid shall be inert to all chemicals naturally found in soils and shall have no solvents at ambient temperature. It shall not be

susceptible to hydrolysis, shall be resistant to aqueous solutions of salts, acids and alkalis, shall be non-biodegradable and shall have a minimum of 2% finely divided carbon black, as determined by BS 2782 Part 4, Method 452B 1993, to inhibit attack by ultra violet light.

4. The Quality Control Strength, when tested in accordance with ISO 10319 and expressed as the lower 95% confidence limit in accordance with ISO 2602-1980 (BS 2846, Part 2, 1981), shall be 30.0kN/m and 30.0kN/m with a peak strain of around 11.0% and 11.0% in the longitudinal and transverse directions respectively.

In addition, typically the load at 2% strain shall be 10.5kN/m and 10.5kN/m in the longitudinal and transverse directions respectively and the load at 5% strain shall be 21.0kN/m and 21.0kN/m in the longitudinal and transverse directions respectively.

5. The typical strength of the nodes between the longitudinal and transverse ribs, as determined by the Geosynthetics Research Institute, Drexel University, USA, Test Method GG2-87, shall be ≥95% of the Quality Control Strength in both longitudinal and transverse directions.



WTB Geotechnics - UK Office, Earl Russell Way, Lawrence Hill, Bristol BS5 0WT, Tel: 0845 600 5505 Fax: 0845 609 2525  
 WTB Geotechnics - Ireland Office, Roskeen North, Newport, Co. Mayo, Tel: 00353 (0)868270973 Fax: 00353 (0)9842949  
 E-mail: geotechnics@wtbgroup.com Web: www.geotechnics-uk.com

Disclaimer: The information in this brochure is to the best of our knowledge true and accurate but all recommendations or suggestions are made without guarantee. Over the conditions of use are beyond their control. WTB Geotechnics disclaims any liability for loss or damage of any kind arising from the use of these data or suggestions. Furthermore no liability is accepted for use of any product in accordance with these data or suggestions, whether any patent. WTB Geotechnics reserves the right to change product specifications without further notification.



**ANEXO III**  
**RESULTADOS DEL ANÁLISIS**  
**ESTADÍSTICO CON SPSS DEL ENSAYO 0**



## Análisis de normalidad de los caudales

### Prueba de Kolmogorov-Smirnov para una muestra

		Caudal
	N	75
Parámetros normales <sup>a,b</sup>	Media	2,9065
	Desviación típica	,93037
Diferencias más extremas	Absoluta	,100
	Positiva	,100
	Negativa	-,099
	Z de Kolmogorov-Smirnov	,864
	Sig. asintót. (bilateral)	,444

a. La distribución de contraste es la Normal.

b. Se han calculado a partir de los datos.

### Prueba de homogeneidad de varianzas

Caudal

Estadístico de Levene	gl1	gl2	Sig.
,136	4	70	,969

## ANOVA de número de eventos

### ANOVA

Caudal

	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Inter-grupos	5,730	4	1,432	1,719	,155
Intra-grupos	58,324	70	,833		
Total	64,053	74			

## ANOVA de geotextiles

### Prueba de homogeneidad de varianzas

Caudal

Estadístico de Levene	gl1	gl2	Sig.
,888	2	72	,416

### ANOVA

Caudal

	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Inter-grupos	17,334	2	8,667	13,356	,000
Intra-grupos	46,720	72	,649		
Total	64,053	74			

## Pruebas post hoc

### Comparaciones múltiples

Caudal

HSD de Tukey

(I) Geotextil	(J) Geotextil	Diferencia de medias (I-J)	Error típico	Sig.
Amopave	H. F. Inbitex	,50760	,22784	,073
	Polyfelt TS 30	-,66640*	,22784	,013
Inbitex	Amopave	-,50760	,22784	,073
	Polyfelt TS 30	-1,17400*	,22784	,000
Polyfelt TS 30	Amopave	,66640*	,22784	,013
	H. F. Inbitex	1,17400*	,22784	,000

\*. La diferencia de medias es significativa al nivel 0.05.

### Comparaciones múltiples

Caudal

HSD de Tukey

(I) Geotextil	(J) Geotextil	Intervalo de confianza al 95%	
		Límite inferior	Límite superior
Amopave	H. F. Inbitex	-,0376	1,0528
	Polyfelt TS 30	-1,2116	-,1212
Inbitex	Amopave	-1,0528	,0376
	Polyfelt TS 30	-1,7192	-,6288
Polyfelt TS 30	Amopave	,1212	1,2116
	H. F. Inbitex	,6288	1,7192

### Subconjuntos homogéneos

Caudal

HSD de Tukey<sup>a</sup>

Geotextil	N	Subconjunto para alfa = 0.05	
		1	2
H. F. Inbitex	25	2,3460	
Amopave	25	2,8536	
Polyfelt TS 30	25		3,5200
Sig.		,073	1,000

Se muestran las medias para los grupos en los subconjuntos homogéneos.

a. Usa el tamaño muestral de la media armónica = 25,000.

## Prueba T para influencia de aire en las probetas

**Estadísticos de grupo**

Presencia de aire	N	Media	Desviación típ.	Error típ. de la media
Caudal sí	36	2,2506	,78865	,13144
no	39	3,5121	,57340	,09182

**Prueba de muestras independientes**

		Prueba de Levene para la igualdad de varianzas		Prueba T para la igualdad de medias	
		F	Sig.	t	gl
Caudal	Se han asumido varianzas iguales	2,780	,100	-7,967	73
	No se han asumido varianzas iguales			-7,868	63,553

**Prueba de muestras independientes**

		Prueba T para la igualdad de medias		
		Sig. (bilateral)	Diferencia de medias	Error típ. de la diferencia
Caudal	Se han asumido varianzas iguales	,000	-1,26150	,15834
	No se han asumido varianzas iguales	,000	-1,26150	,16033

**Prueba de muestras independientes**

		Prueba T para la igualdad de medias	
		95% Intervalo de confianza para la diferencia	
		Inferior	Superior
Caudal	Se han asumido varianzas iguales	-1,57707	-,94592
	No se han asumido varianzas iguales	-1,58184	-,94115

**Prueba T para influencia de aire en las probetas según geotextil**

**Geotextil = Amopave**

**Estadísticos de grupo<sup>a</sup>**

Presencia de aire	N	Media	Desviación típ.	Error típ. de la media
Caudal sí	12	2,5192	,93715	,27053
no	13	3,1623	,69770	,19351

a. Geotextil = Amopave

**Prueba de muestras independientes<sup>a</sup>**

		Prueba de Levene para la igualdad de varianzas		Prueba T para la igualdad de medias	
		F	Sig.	t	gl
Caudal	Se han asumido varianzas iguales	2,780	,109	-1,957	23
	No se han asumido varianzas iguales			-1,934	20,271

a. Geotextil = Amopave

**Prueba de muestras independientes<sup>a</sup>**

		Prueba T para la igualdad de medias		
		95% Intervalo de confianza para la diferencia		
		Sig. (bilateral)	Diferencia de medias	Error típ. de la diferencia
Caudal	Se han asumido varianzas iguales	,063	-,64314	,32865
	No se han asumido varianzas iguales	,067	-,64314	,33261

a. Geotextil = Amopave

**Prueba de muestras independientes<sup>a</sup>**

		Prueba T para la igualdad de medias	
		95% Intervalo de confianza para la diferencia	
		Inferior	Superior
Caudal	Se han asumido varianzas iguales	-1,32301	,03673
	No se han asumido varianzas iguales	-1,33637	,05009

a. Geotextil = Amopave

**Geotextil = Hanson Formpave Inbitex**

**Estadísticos de grupo<sup>a</sup>**

Presencia de	N	Media	Desviación típ.	Error típ. de la media
Caudal sí	18	1,8906	,41798	,09852
no	7	3,5171	,30456	,11511

a. Geotextil = Hanson Formpave Inbitex

**Prueba de muestras independientes<sup>a</sup>**

		Prueba de Levene para la igualdad de varianzas		Prueba T para la igualdad de medias	
		F	Sig.	t	gl
Caudal	Se han asumido varianzas iguales	1,799	,193	-9,326	23
	No se han asumido varianzas iguales			-10,735	15,142

a. Geotextil = Hanson Formpave Inbitex

**Prueba de muestras independientes<sup>a</sup>**

		Prueba T para la igualdad de medias		
		Sig. (bilateral)	Diferencia de medias	Error típ. de la diferencia
Caudal	Se han asumido varianzas iguales	,000	-1,62659	,17442
	No se han asumido varianzas iguales	,000	-1,62659	,15152

a. Geotextil = Hanson Formpave Inbitex

**Prueba de muestras independientes<sup>a</sup>**

		Prueba T para la igualdad de medias	
		95% Intervalo de confianza para la diferencia	
		Inferior	Superior
Caudal	Se han asumido varianzas iguales	-1,98741	-1,26577
	No se han asumido varianzas iguales	-1,94927	-1,30390

a. Geotextil = Hanson Formpave Inbitex

## Geotextil = Polyfelt TS 30

**Estadísticos de grupo<sup>a</sup>**

Presencia de aire	N	Media	Desviación típ.	Error típ. de la media
Caudal sí	6	2,7933	,91343	,37290
no	19	3,7495	,43681	,10021

a. Geotextil = Polyfelt TS 30

**Prueba de muestras independientes<sup>a</sup>**

	Prueba de Levene para la igualdad de varianzas		Prueba T para la igualdad de medias	
	F	Sig.	t	gl
	Caudal Se han asumido varianzas iguales	6,354	,019	-3,550
No se han asumido varianzas iguales			-2,476	5,740

a. Geotextil = Polyfelt TS 30

**Prueba de muestras independientes<sup>a</sup>**

	Prueba T para la igualdad de medias		
	Sig. (bilateral)	Diferencia de medias	Error típ. de la diferencia
	Caudal Se han asumido varianzas iguales	,002	-,95614
No se han asumido varianzas iguales	,050	-,95614	,38613

a. Geotextil = Polyfelt TS 30

**Prueba de muestras independientes<sup>a</sup>**

		Prueba T para la igualdad de medias	
		95% Intervalo de confianza para la diferencia	
		Inferior	Superior
Caudal	Se han asumido varianzas iguales	-1,51323	-,39905
	No se han asumido varianzas iguales	-1,91145	-,00083

a. Geotextil = Polyfelt TS 30



**ANEXO IV**  
**RESULTADOS DEL ANÁLISIS**  
**ESTADÍSTICO CON SPSS DEL ENSAYO 1**



## Análisis de concentración de sólidos en el efluente

### Análisis de normalidad

Resumen del procesamiento de los casos

	Casos					
	Válidos		Perdidos		Total	
	N	Porcentaje	N	Porcentaje	N	Porcentaje
EMC <sub>s</sub>	18	100,0%	0	,0%	18	100,0%

Pruebas de normalidad

	Kolmogorov-Smirnov <sup>a</sup>			Shapiro-Wilk		
	Estadístico	gl	Sig.	Estadístico	gl	Sig.
EMC <sub>s</sub>	,148	18	,200*	,919	18	,123

a. Corrección de la significación de Lilliefors

\*. Este es un límite inferior de la significación verdadera.

### Análisis de regresión

Variables introducidas/eliminadas<sup>a</sup>

Modelo	Variables introducidas	Variables eliminadas	Método
1	C.Sed	.	Por pasos (criterio: Prob. de F para entrar <= ,050, Prob. de F para salir >= ,100).
2	Caudal	.	Por pasos (criterio: Prob. de F para entrar <= ,050, Prob. de F para salir >= ,100).
3	C.Fil	.	Por pasos (criterio: Prob. de F para entrar <= ,050, Prob. de F para salir >= ,100).

a. Variable dependiente: EMCS

**Resumen del modelo<sup>d</sup>**

Modelo	R	R cuadrado	R cuadrado corregida	Error típ. de la estimación	Durbin-Watson
1	,834 <sup>a</sup>	,696	,677	9,8525	
2	,884 <sup>b</sup>	,782	,753	8,6232	
3	,929 <sup>c</sup>	,863	,834	7,0723	3,026

- a. Variables predictoras: (Constante), C.Sed  
 b. Variables predictoras: (Constante), C.Sed, Caudal  
 c. Variables predictoras: (Constante), C.Sed, Caudal, C.Fil  
 d. Variable dependiente: EMC<sub>s</sub>

**ANOVA<sup>d</sup>**

Modelo		Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
1	Regresión	3561,106	1	3561,106	36,685	,000 <sup>a</sup>
	Residual	1553,154	16	97,072		
	Total	5114,260	17			
2	Regresión	3998,877	2	1999,438	26,889	,000 <sup>b</sup>
	Residual	1115,383	15	74,359		
	Total	5114,260	17			
3	Regresión	4414,018	3	1471,339	29,417	,000 <sup>c</sup>
	Residual	700,242	14	50,017		
	Total	5114,260	17			

- a. Variables predictoras: (Constante), C.Sed  
 b. Variables predictoras: (Constante), C.Sed, Caudal  
 c. Variables predictoras: (Constante), C.Sed, Caudal, C.Fil  
 d. Variable dependiente: EMC<sub>s</sub>

**Coefficientes<sup>a</sup>**

Modelo		Coefficients no estandarizados		Coefficients tipificados		
		B	Error típ.	Beta	t	Sig.
1	(Constante)	1,463	5,446		,269	,792
	C.Sed	,149	,025	,834	6,057	,000
2	(Constante)	-11,466	7,149		-1,604	,130
	C.Sed	,149	,022	,834	6,920	,000
	Caudal	2,135	,880	,293	2,426	,028
3	(Constante)	-1,278	6,847		-,187	,855
	C.Sed	,149	,018	,834	8,438	,000
	Caudal	2,135	,722	,293	2,958	,010
	C.Fil	-5,094	1,768	-,285	-2,881	,012

a. Variable dependiente: EMC<sub>s</sub>

**Coefficientes<sup>a</sup>**

Modelo		Estadísticos de colinealidad	
		Tolerancia	FIV
1	C.Sed	1,000	1,000
2	C.Sed	1,000	1,000
	Caudal	1,000	1,000
3	C.Sed	1,000	1,000
	Caudal	1,000	1,000
	C.Fil	1,000	1,000

a. Variable dependiente: EMC<sub>s</sub>

**VARIABLES EXCLUIDAS<sup>d</sup>**

Modelo		Estadísticos de colinealidad			Correlación parcial
		Beta dentro	t	Sig.	
1	Caudal	,293 <sup>a</sup>	2,426	,028	,531
	C.Fil	-,285 <sup>a</sup>	-2,339	,034	-,517
	L.Fil	,053 <sup>a</sup>	,373	,715	,096
	C.Ace	,086 <sup>a</sup>	,614	,548	,157
2	C.Fil	-,285 <sup>b</sup>	-2,881	,012	-,610
	L.Fil	,053 <sup>b</sup>	,426	,677	,113
	C.Ace	,086 <sup>b</sup>	,704	,493	,185
3	L.Fil	,053 <sup>c</sup>	,520	,612	,143
	C.Ace	,086 <sup>c</sup>	,865	,403	,233

a. Variables predictoras en el modelo: (Constante), C.Sed

b. Variables predictoras en el modelo: (Constante), C.Sed, Caudal

c. Variables predictoras en el modelo: (Constante), C.Sed, Caudal, C.Fil

d. Variable dependiente: EMC<sub>s</sub>

**VARIABLES EXCLUIDAS<sup>d</sup>**

Modelo		Estadísticos de colinealidad		
		Tolerancia	FIV	Tolerancia mínima
1	Caudal	1,000	1,000	1,000
	C.Fil	1,000	1,000	1,000
	L.Fil	1,000	1,000	1,000
	C.Ace	1,000	1,000	1,000
2	C.Fil	1,000	1,000	1,000
	L.Fil	1,000	1,000	1,000
	C.Ace	1,000	1,000	1,000
3	L.Fil	1,000	1,000	1,000
	C.Ace	1,000	1,000	1,000

d. Variable dependiente: EMC<sub>s</sub>

**Correlaciones de los coeficientes<sup>a</sup>**

Modelo			C.Sed	Caudal	C.Fil
1	Correlaciones	C.Sed	1,000		
	Covarianzas	C.Sed	,001		
2	Correlaciones	C.Sed	1,000	,000	
		Caudal	,000	1,000	
	Covarianzas	C.Sed	,000	,000	
		Caudal	,000	,774	
3	Correlaciones	C.Sed	1,000	,000	,000
		Caudal	,000	1,000	,000
		C.Fil	,000	,000	1,000
	Covarianzas	C.Sed	,000	,000	,000
		Caudal	,000	,521	,000
		C.Fil	,000	,000	3,126

a. Variable dependiente: EMC<sub>s</sub>

**Diagnósticos de colinealidad<sup>a</sup>**

Modelo	Dimensión	Autovalores		Índice de condición
		Autovalores	Índice de condición	
1	1	1,905	1,000	
	2	,095	4,467	
2	1	2,790	1,000	
	2	,158	4,207	
	3	,053	7,289	
3	1	3,627	1,000	
	2	,182	4,467	
	3	,148	4,956	
	4	,043	9,173	

a. Variable dependiente: EMC<sub>s</sub>

**Diagnósticos de colinealidad<sup>a</sup>**

Modelo	Dimensión	Proporciones de la varianza			
		(Constante)	C.Sed	Caudal	C.Fil
1	1	,05	,05		
	2	,95	,95		
2	1	,01	,02	,02	
	2	,01	,68	,32	
	3	,98	,30	,67	
3	1	,00	,01	,01	,01
	2	,00	,50	,00	,50
	3	,01	,25	,50	,25
	4	,99	,24	,49	,24

a. Variable dependiente: EMC<sub>s</sub>

**Estadísticos sobre los residuos<sup>a</sup>**

	Mínimo	Máximo	Media	Desviación típica	N
Valor pronosticado	6,045	56,531	31,300	16,1136	18
Residual	-10,4700	13,6687	,0000	6,4180	18
Valor pronosticado tip.	-1,567	1,566	,000	1,000	18
Residuo típ.	-1,480	1,933	,000	,907	18

a. Variable dependiente: EMC<sub>s</sub>

**Análisis de residuos**

**Resumen del procesamiento de los casos**

	Casos					
	Válidos		Perdidos		Total	
	N	Porcentaje	N	Porcentaje	N	Porcentaje
Standardized Residual	18	100,0%	0	,0%	18	100,0%

**Pruebas de normalidad**

	Kolmogorov-Smirnov <sup>a</sup>			Shapiro-Wilk		
	Estadístico	gl	Sig.	Estadístico	gl	Sig.
Standardized Residual	,136	18	,200*	,951	18	,437

a. Corrección de la significación de Lilliefors

\*. Este es un límite inferior de la significación verdadera.

**Análisis de eficiencia depuración de sólidos**

**Análisis de normalidad**

**Resumen del procesamiento de los casos**

	Casos					
	Válidos		Perdidos		Total	
	N	Porcentaje	N	Porcentaje	N	Porcentaje
EfS	18	100,0%	0	,0%	18	100,0%

**Pruebas de normalidad**

	Kolmogorov-Smirnov <sup>a</sup>			Shapiro-Wilk		
	Estadístico	gl	Sig.	Estadístico	gl	Sig.
EfS	,084	18	,200*	,974	18	,876

a. Corrección de la significación de Lilliefors

\*. Este es un límite inferior de la significación verdadera.

## Análisis de regresión

**Variables introducidas/eliminadas<sup>a</sup>**

Modelo	Variables introducidas	Variables eliminadas	Método
1	C.Fil	.	Por pasos (criterio: Prob. de F para entrar <= ,050, Prob. de F para salir >= ,100).
2	Caudal	.	Por pasos (criterio: Prob. de F para entrar <= ,050, Prob. de F para salir >= ,100).

a. Variable dependiente: Efs

**Resumen del modelo<sup>c</sup>**

Modelo	R	R cuadrado	R cuadrado corregida	Error típ. de la estimación	Durbin-Watson
1	,597 <sup>a</sup>	,356	,316	3,0153	
2	,728 <sup>b</sup>	,531	,468	2,6596	2,024

a. Variables predictoras: (Constante), C.Fil

b. Variables predictoras: (Constante), C.Fil, Caudal

c. Variable dependiente: Efs

**ANOVA<sup>c</sup>**

Modelo		Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
1	Regresión	80,551	1	80,551	8,860	,009 <sup>a</sup>
	Residual	145,469	16	9,092		
	Total	226,020	17			

(Continúa en página siguiente)

**ANOVA<sup>c</sup>** (continuación)

Modelo	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.	
2	Regresión	119,918	2	59,959	8,477	,003 <sup>b</sup>
	Residual	106,102	15	7,073		
	Total	226,020	17			

a. Variables predictoras: (Constante), C.Fil

b. Variables predictoras: (Constante), C.Fil, Caudal

c. Variable dependiente: Ef<sub>s</sub>

**Coefficientes<sup>a</sup>**

Modelo		Coefficients no estandarizados		Coefficients tipificados		
		B	Error típ.	Beta	t	Sig.
1	(Constante)	81,212	1,667		48,725	,000
	C.Fil	2,244	,754	,597	2,977	,009
2	(Constante)	85,089	2,205		38,589	,000
	C.Fil	2,244	,665	,597	3,375	,004
	Caudal	-,640	,271	-,417	-2,359	,032

a. Variable dependiente: EfS

**Coefficientes<sup>a</sup>**

Modelo		Estadísticos de colinealidad	
		Tolerancia	FIV
1	C.Fil	1,000	1,000
2	C.Fil	1,000	1,000
	Caudal	1,000	1,000

a. Variable dependiente: Ef<sub>s</sub>

**Variables excluidas<sup>c</sup>**

Modelo		Estadísticos de colinealidad			
		Beta dentro	t	Sig.	Correlación parcial
1	Caudal	-,417 <sup>a</sup>	-2,359	,032	-,520
	L.Fil	-,191 <sup>a</sup>	-,951	,357	-,238
	C.Sed	,138 <sup>a</sup>	,676	,509	,172
	C.Ace	-,301 <sup>a</sup>	-1,568	,138	-,375
2	L.Fil	-,191 <sup>b</sup>	-1,088	,295	-,279
	C.Sed	,138 <sup>b</sup>	,770	,454	,201
	C.Ace	-,301 <sup>b</sup>	-1,830	,089	-,439

a. Variables predictoras en el modelo: (Constante), C.Fil

b. Variables predictoras en el modelo: (Constante), C.Fil, Caudal

c. Variable dependiente: Ef<sub>s</sub>

**Variables excluidas<sup>c</sup>**

Modelo		Estadísticos de colinealidad		
		Tolerancia	FIV	Tolerancia mínima
1	Caudal	1,000	1,000	1,000
	L.Fil	1,000	1,000	1,000
	C.Sed	1,000	1,000	1,000
	C.Ace	1,000	1,000	1,000
2	L.Fil	1,000	1,000	1,000
	C.Sed	1,000	1,000	1,000
	C.Ace	1,000	1,000	1,000

c. Variable dependiente: Ef<sub>s</sub>

**Estadísticos sobre los residuos<sup>a</sup>**

	Mínimo	Máximo	Media	Desviación típica	N
Valor pronosticado	81,891	89,516	85,700	2,6559	18
Residual	-5,1159	4,4841	,0000	2,4983	18
Valor pronosticado tip.	-1,434	1,437	,000	1,000	18
Residuo típ.	-1,924	1,686	,000	,939	18

a. Variable dependiente: Efs

**Análisis de residuos**

**Resumen del procesamiento de los casos**

	Casos					
	Válidos		Perdidos		Total	
	N	Porcentaje	N	Porcentaje	N	Porcentaje
Unstandardized Residual	18	100,0%	0	,0%	18	100,0%

**Pruebas de normalidad**

	Kolmogorov-Smirnov <sup>a</sup>			Shapiro-Wilk		
	Estadístico	gl	Sig.	Estadístico	gl	Sig.
Unstandardized Residual	,084	18	,200*	,988	18	,996

a. Corrección de la significación de Lilliefors

\*. Este es un límite inferior de la significación verdadera.

## Análisis de concentración de aceites en el efluente

### Análisis de normalidad

Resumen del procesamiento de los casos

	Casos					
	Válidos		Perdidos		Total	
	N	Porcentaje	N	Porcentaje	N	Porcentaje
EMCA	18	100,0%	0	,0%	18	100,0%

Pruebas de normalidad

	Kolmogorov-Smirnov <sup>a</sup>			Shapiro-Wilk		
	Estadístico	gl	Sig.	Estadístico	gl	Sig.
EMCA	,148	18	,200*	,946	18	,373

a. Corrección de la significación de Lilliefors

\*. Este es un límite inferior de la significación verdadera.

### Análisis de regresión

Variables introducidas/eliminadas<sup>a</sup>

Modelo	Variables introducidas	Variables eliminadas	Método
1	Caudal	.	Por pasos (criterio: Prob. de F para entrar <= ,050, Prob. de F para salir >= ,100).
2	C.Ace	.	Por pasos (criterio: Prob. de F para entrar <= ,050, Prob. de F para salir >= ,100).

a. Variable dependiente: EMCA

**Resumen del modelo<sup>c</sup>**

Modelo	R	R cuadrado	R cuadrado corregida	Error típ. de la estimación	Durbin-Watson
1	,638 <sup>a</sup>	,407	,370	,1511	
2	,744 <sup>b</sup>	,553	,494	,1355	1,605

a. Variables predictoras: (Constante), Caudal

b. Variables predictoras: (Constante), Caudal, C.Ace

c. Variable dependiente: EMCA

**ANOVA<sup>c</sup>**

Modelo		Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
1	Regresión	,251	1	,251	10,983	,004 <sup>a</sup>
	Residual	,365	16	,023		
	Total	,616	17			
2	Regresión	,341	2	,170	9,283	,002 <sup>b</sup>
	Residual	,275	15	,018		
	Total	,616	17			

a. Variables predictoras: (Constante), Caudal

b. Variables predictoras: (Constante), Caudal, C.Ace

c. Variable dependiente: EMCA

**Coefficientes<sup>a</sup>**

Modelo		Coefficients no estandarizados		Coefficients tipificados		
		B	Error típ.	Beta	t	Sig.
1	(Constante)	,737	,100		7,377	,000
	Caudal	-,051	,015	-,638	-3,314	,004
2	(Constante)	,587	,112		5,228	,000
	Caudal	-,051	,014	-,638	-3,696	,002
	C.Ace	,007	,003	,382	2,214	,043

**Coeficientes<sup>a</sup>**

Modelo		Coeficientes no estandarizados		Coeficientes tipificados		
		B	Error típ.	Beta	t	Sig.
1	(Constante)	,737	,100		7,377	,000
	Caudal	-,051	,015	-,638	-3,314	,004
2	(Constante)	,587	,112		5,228	,000
	Caudal	-,051	,014	-,638	-3,696	,002
	C.Ace	,007	,003	,382	2,214	,043

a. Variable dependiente: EMCA

**Coeficientes<sup>a</sup>**

Modelo		Estadísticos de colinealidad	
		Tolerancia	FIV
1	Caudal	1,000	1,000
2	Caudal	1,000	1,000
	C.Ace	1,000	1,000

a. Variable dependiente: EMCA

**Variables excluidas<sup>c</sup>**

Modelo		Variables excluidas <sup>c</sup>			
		Beta dentro	t	Sig.	Correlación parcial
1	C.Fil	,064 <sup>a</sup>	,321	,752	,083
	L.Fil	,000 <sup>a</sup>	,000	1,000	,000
	C.Sed	,000 <sup>a</sup>	,000	1,000	,000
	C.Ace	,382 <sup>a</sup>	2,214	,043	,496
2	C.Fil	,064 <sup>b</sup>	,358	,726	,095
	L.Fil	,000 <sup>b</sup>	,000	1,000	,000
	C.Sed	,000 <sup>b</sup>	,000	1,000	,000

a. Variables predictoras en el modelo: (Constante), Caudal

b. Variables predictoras en el modelo: (Constante), Caudal, C.Ace

c. Variable dependiente: EMCA

**Variables excluidas<sup>c</sup>**

Modelo		Estadísticos de colinealidad		
		Tolerancia	FIV	Tolerancia mínima
1	C.Fil	1,000	1,000	1,000
	L.Fil	1,000	1,000	1,000
	C.Sed	1,000	1,000	1,000
	C.Ace	1,000	1,000	1,000
2	C.Fil	1,000	1,000	1,000
	L.Fil	1,000	1,000	1,000
	C.Sed	1,000	1,000	1,000

c. Variable dependiente: EMCA

**Diagnósticos de colinealidad<sup>a</sup>**

Modelo	Dimensión	Proporciones de la varianza				
		Autovalores	Índice de condición	(Constante)	Caudal	C.Ace
1	1	1,934	1,000	,03	,03	
	2	,066	5,427	,97	,97	
2	1	2,790	1,000	,01	,02	,02
	2	,158	4,207	,01	,32	,68
	3	,053	7,289	,98	,67	,30

a. Variable dependiente: EMCA

**Estadísticos sobre los residuos<sup>a</sup>**

	Mínimo	Máximo	Media	Desviación típica	N
Valor pronosticado	,228	,628	,428	,1416	18
Residual	-,2279	,1721	,0000	,1273	18
Valor pronosticado tip.	-1,412	1,416	,000	1,000	18
Residuo típ.	-1,682	1,271	,000	,939	18

a. Variable dependiente: EMCA

## Análisis de residuos

**Pruebas de normalidad**

	Kolmogorov-Smirnov <sup>a</sup>			Shapiro-Wilk		
	Estadístico	gl	Sig.	Estadístico	gl	Sig.
Unstandardized Residual	,269	18	,001	,883	18	,029

a. Corrección de la significación de Lilliefors

## Análisis de eficiencia de depuración de aceites

### Análisis de normalidad

**Resumen del procesamiento de los casos**

	Casos					
	Válidos		Perdidos		Total	
	N	Porcentaje	N	Porcentaje	N	Porcentaje
EfA	18	100,0%	0	,0%	18	100,0%

**Pruebas de normalidad**

	Kolmogorov-Smirnov <sup>a</sup>			Shapiro-Wilk		
	Estadístico	gl	Sig.	Estadístico	gl	Sig.
EfA	,110	18	,200*	,973	18	,844

a. Corrección de la significación de Lilliefors

\*. Este es un límite inferior de la significación verdadera.

## Análisis de regresión

**VARIABLES INTRODUCIDAS/ELIMINADAS<sup>a</sup>**

Modelo	VARIABLES INTRODUCIDAS	VARIABLES ELIMINADAS	Método
1	C.Ace	.	Por pasos (criterio: Prob. de F para entrar <= ,050, Prob. de F para salir >= ,100).
2	Caudal	.	Por pasos (criterio: Prob. de F para entrar <= ,050, Prob. de F para salir >= ,100).

a. Variable dependiente: Ef<sub>A</sub>

**RESUMEN DEL MODELO<sup>c</sup>**

Modelo	R	R cuadrado	R cuadrado corregida	Error típ. de la estimación	Durbin-Watson
1	,603 <sup>a</sup>	,364	,324	1,2971	
2	,740 <sup>b</sup>	,547	,487	1,1306	1,968

a. Variables predictoras: (Constante), C.Ace

b. Variables predictoras: (Constante), C.Ace, Caudal

c. Variable dependiente: Ef<sub>A</sub>

**ANOVA<sup>c</sup>**

Modelo		Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
1	Regresión	15,406	1	15,406	9,157	,008 <sup>a</sup>
	Residual	26,919	16	1,682		
	Total	42,325	17			
2	Regresión	23,152	2	11,576	9,057	,003 <sup>b</sup>
	Residual	19,173	15	1,278		
	Total	42,325	17			

a. Variables predictoras: (Constante), C.Ace

b. Variables predictoras: (Constante), C.Ace, Caudal

c. Variable dependiente: Ef<sub>A</sub>

**Coefficientes<sup>a</sup>**

Modelo		Coefficients no estandarizados		Coefficients tipificados		
		B	Error típ.	Beta	t	Sig.
1	(Constante)	95,521	,717		133,223	,000
	C.Ace	,098	,032	,603	3,026	,008
2	(Constante)	93,801	,937		100,074	,000
	C.Ace	,098	,028	,603	3,472	,003
	Caudal	,284	,115	,428	2,462	,026

a. Variable dependiente: EfA

**Coefficientes<sup>a</sup>**

Modelo		Estadísticos de colinealidad	
		Tolerancia	FIV
1	C.Ace	1,000	1,000
2	C.Ace	1,000	1,000
	Caudal	1,000	1,000

a. Variable dependiente: Ef<sub>A</sub>

**Variables excluidas<sup>c</sup>**

Modelo					Correlación parcial
		Beta dentro	t	Sig.	
1	Caudal	,428 <sup>a</sup>	2,462	,026	,536
	C.Fil	-,012 <sup>a</sup>	-,056	,956	-,014
	L.Fil	-,065 <sup>a</sup>	-,318	,755	-,082
	C.Sed	,035 <sup>a</sup>	,168	,869	,043
2	C.Fil	-,012 <sup>b</sup>	-,064	,950	-,017
	L.Fil	-,065 <sup>b</sup>	-,365	,721	-,097
	C.Sed	,035 <sup>b</sup>	,193	,850	,051

a. Variables predictoras en el modelo: (Constante), C.Ace

b. Variables predictoras en el modelo: (Constante), C.Ace, Caudal

c. Variable dependiente: Ef<sub>A</sub>

**Variables excluidas<sup>c</sup>**

Modelo		Estadísticos de colinealidad		
		Tolerancia	FIV	Tolerancia mínima
1	Caudal	1,000	1,000	1,000
	C.Fil	1,000	1,000	1,000
	L.Fil	1,000	1,000	1,000
	C.Sed	1,000	1,000	1,000
2	C.Fil	1,000	1,000	1,000
	L.Fil	1,000	1,000	1,000
	C.Sed	1,000	1,000	1,000

c. Variable dependiente: Ef<sub>A</sub>

**Diagnósticos de colinealidad<sup>a</sup>**

Modelo	Dimensión	Autovalores	Índice de condición	Proporciones de la varianza		
				(Constante)	C.Ace	Caudal
1	1	1,905	1,000	,05	,05	
	2	,095	4,467	,95	,95	
2	1	2,790	1,000	,01	,02	,02
	2	,158	4,207	,01	,68	,32
	3	,053	7,289	,98	,30	,67

a. Variable dependiente: Ef<sub>A</sub>

**Estadísticos sobre los residuos<sup>a</sup>**

	Mínimo	Máximo	Media	Desviación típica	N
Valor pronosticado	95,805	99,159	97,483	1,1670	18
Residual	-1,7047	2,8037	,0000	1,0620	18
Valor pronosticado tip.	-1,438	1,436	,000	1,000	18
Residuo típ.	-1,508	2,480	,000	,939	18

a. Variable dependiente: Ef<sub>A</sub>

## Análisis de residuos

### Resumen del procesamiento de los casos

	Casos					
	Válidos		Perdidos		Total	
	N	Porcentaje	N	Porcentaje	N	Porcentaje
Unstandardized Residual	18	100,0%	0	,0%	18	100,0%

### Pruebas de normalidad

	Kolmogorov-Smirnov <sup>a</sup>			Shapiro-Wilk		
	Estadístico	gl	Sig.	Estadístico	gl	Sig.
Unstandardized Residual	,188	18	,093	,918	18	,117

a. Corrección de la significación de Lilliefors

**ANEXO V**  
**RESULTADOS DEL ANÁLISIS**  
**ESTADÍSTICO CON SPSS DEL ENSAYO 2**



## Estimación curvilínea de concentración de sólidos

### Descripción del modelo

	Nombre del modelo	MOD_23
Variable dependiente	1	EMC Sólidos
Ecuación	1	Lineal
	2	Logarítmica
	3	Inversa
	4	Cuadrático
	5	Cúbico
	6	Compuesto <sup>a</sup>
	7	Potencia <sup>a</sup>
	8	S <sup>a</sup>
	9	Crecimiento <sup>a</sup>
	10	Exponencial <sup>a</sup>
	Variable independiente	Número de evento
	Constante	Incluidos
	Variable cuyos valores etiquetan las observaciones en los gráficos	Sin especificar
	Tolerancia para la entrada de términos en ecuaciones	,0001

a. El modelo necesita todos los valores no perdidos para ser positivo.

### Resumen del procesamiento de los casos

	N
Total de casos	14
Casos excluidos <sup>a</sup>	10
Casos pronosticados	0
Casos creados nuevos	0

a. Los casos con un valor perdido en cualquier variable se excluyen del análisis.

**Resumen del procesamiento de las variables**

	Variables	
	Dependiente	Independiente
	EMC Sólidos	Número de evento
Número de valores positivos	4	14
Número de ceros	0	0
Número de valores negativos	0	0
Número de valores perdidos Perdidos definidos por el usuario	0	0
Perdidos del sistema	10	0

**Resumen del modelo y estimaciones de los parámetros**

Variable dependiente: EMC Sólidos

Ecuación	Resumen del modelo					Estimaciones de los parámetros
	R cuadrado	F	gl1	gl2	Sig.	Constante
Lineal	,464	1,728	1	2	,319	
Logarítmica	,688	4,415	1	2	,170	
Inversa	,786	7,331	1	2	,114	
Cuadrático	1,000	1222,904	2	1	,020	
Cúbico	1,000		3	0		
Compuesto	,345	1,056	1	2	,412	19,418
Potencia	,573	2,679	1	2	,243	21,094
S	,680	4,259	1	2	,175	2,337
Crecimiento	,345	1,056	1	2	,412	2,966
Exponencial	,345	1,056	1	2	,412	19,418

La variable independiente es Número de evento.

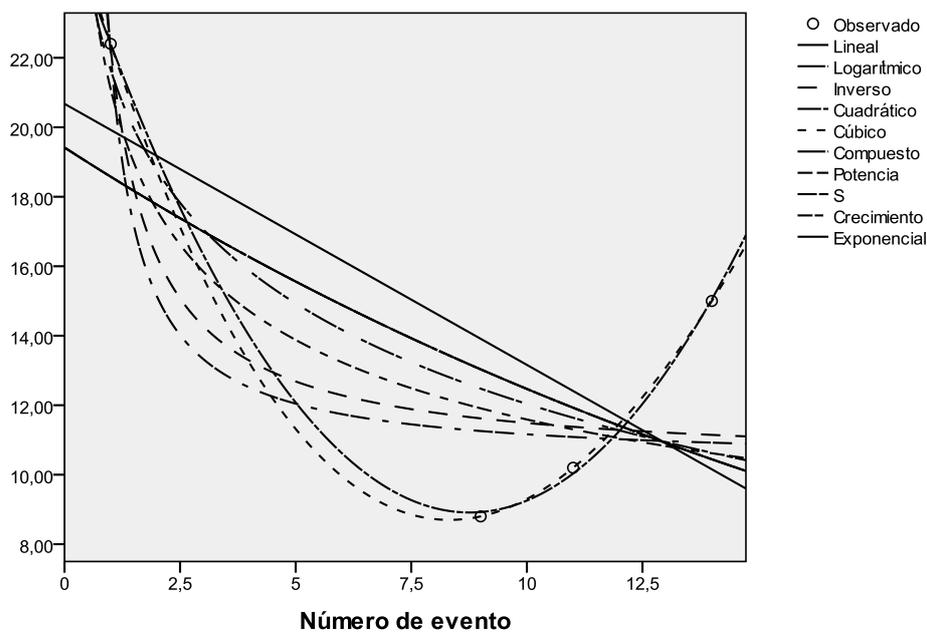
**Resumen del modelo y estimaciones de los parámetros**

Variable dependiente: EMC Sólidos

Ecuación	Estimaciones de los parámetros			
	Constante	b1	b2	b3
Lineal	20,675	-,751		
Logarítmica	21,653	-4,176		
Inversa	10,291	11,963		
Cuadrático	26,087	-3,920	,224	
Cúbico	26,717	-4,649	,337	-,005
Compuesto		,957		
Potencia		-,260		
S		,760		
Crecimiento		-,044		
Exponencial		-,044		

La variable independiente es Número de evento.

**EMC Sólidos**



## Análisis del modelo cuadrático

**Resumen del modelo**

R	R cuadrado	R cuadrado corregida	Error típico de la estimación
1,000	1,000	,999	,215

La variable independiente es Número de evento.

**ANOVA**

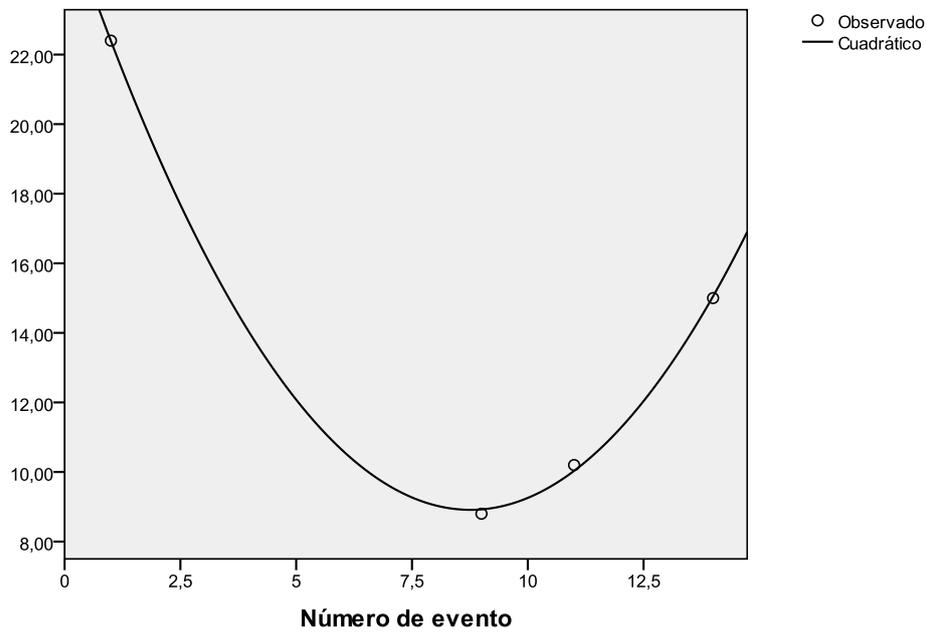
	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Regresión	112,954	2	56,477	1222,904	,020
Residual	,046	1	,046		
Total	113,000	3			

La variable independiente es Número de evento.

**Coefficientes**

	Coefficients no estandarizados		Coefficients estandarizados		
	B	Error típico	Beta	t	Sig.
Número de evento	-3,920	,090	-3,552	-43,416	,015
Número de evento ** 2	,224	,006	2,963	36,217	,018
(Constante)	26,087	,268		97,224	,007

### EMC Sólidos



### Análisis de residuos del modelo cuadrático

#### Resumen del procesamiento de los casos

	Casos					
	Válidos		Perdidos		Total	
	N	Porcentaje	N	Porcentaje	N	Porcentaje
Error EMC Sólidos cuad	4	28,6%	10	71,4%	14	100,0%

#### Descriptivos

		Estadístico
Error EMC Sólidos cuad	Media	,0000000
	Intervalo de confianza para la media al 95%	
	Límite inferior	-,1974285
	Límite superior	,1974285
	Media recortada al 5%	-,0023163
	Mediana	-,0208463

(Continúa en página siguiente)

**Descriptivos (continuación)**

	Estadístico
Varianza	,015
Desv. típ.	,12407340
Mínimo	-,12508
Máximo	,16677
Rango	,29185
Amplitud intercuartil	,23412
Asimetría	,889
Curtosis	,921

**Descriptivos**

		Error típ.
Error EMC Sólidos cuad	Media	,06203670
	Asimetría	1,014
	Curtosis	2,619

**Pruebas de normalidad**

	Kolmogorov-Smirnov <sup>a</sup>			Shapiro-Wilk		
	Estadístico	gl	Sig.	Estadístico	gl	Sig.
Error EMC Sólidos cuad	,219	4	.	,961	4	,788

a. Corrección de la significación de Lilliefors

**Prueba de rachas**

	Error EMC Sólidos cuad
Valor de prueba <sup>a</sup>	-,02085
Casos < Valor de prueba	2
Casos >= Valor de prueba	2

(Continúa en página siguiente)

**Prueba de rachas (continuación)**

	Error EMC Sólidos cuad
Casos en total	4
Número de rachas	4
Z	,612
Sig. asintót. (bilateral)	,540

a. Mediana

**Estimación curvilínea de la eficiencia de depuración de sólidos**

**Descripción del modelo**

	Nombre del modelo	MOD_25
Variable dependiente	1	Eficiencia Sólidos
Ecuación	1	Lineal
	2	Logarítmica
	3	Inversa
	4	Cuadrático
	5	Cúbico
	6	Compuesto <sup>a</sup>
	7	Potencia <sup>a</sup>
	8	S <sup>a</sup>
	9	Crecimiento <sup>a</sup>
	10	Exponencial <sup>a</sup>
	Variable independiente	Número de evento
	Constante	Incluidos
	Variable cuyos valores etiquetan las observaciones en los gráficos	Sin especificar
	Tolerancia para la entrada de términos en ecuaciones	,0001

a. El modelo necesita todos los valores no perdidos para ser positivo.

**Resumen del procesamiento de los casos**

	N
Total de casos	14
Casos excluidos <sup>a</sup>	10
Casos pronosticados	0
Casos creados nuevos	0

a. Los casos con un valor perdido en cualquier variable se excluyen del análisis.

**Resumen del modelo y estimaciones de los parámetros**

Variable dependiente: Eficiencia Sólidos

Ecuación	Resumen del modelo					Estimaciones de los parámetros
	R cuadrado	F	gl1	gl2	Sig.	Constante
Lineal	,464	1,728	1	2	,319	
Logarítmica	,688	4,415	1	2	,170	
Inversa	,786	7,331	1	2	,114	
Cuadrático	1,000	1222,904	2	1	,020	
Cúbico	1,000		3	0		
Compuesto	,473	1,795	1	2	,312	89,621
Potencia	,697	4,601	1	2	,165	89,156
S	,793	7,679	1	2	,109	4,552
Crecimiento	,473	1,795	1	2	,312	4,496
Exponencial	,473	1,795	1	2	,312	89,621

La variable independiente es Número de evento.

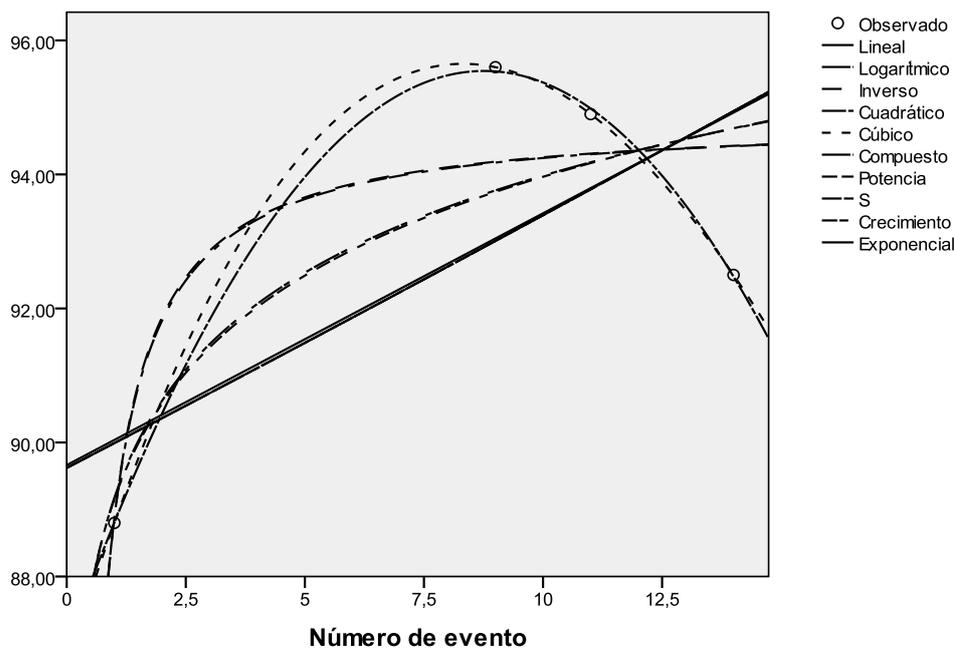
**Resumen del modelo y estimaciones de los parámetros**

Variable dependiente: Eficiencia Sólidos

Ecuación	Estimaciones de los parámetros			
	Constante	b1	b2	b3
Lineal	89,662	,376		
Logarítmica	89,174	2,088		
Inversa	94,854	-5,982		
Cuadrático	86,956	1,960	-,112	
Cúbico	86,642	2,325	-,168	,002
Compuesto		1,004		
Potencia		,023		
S		-,065		
Crecimiento		,004		
Exponencial		,004		

La variable independiente es Número de evento.

**Eficiencia Sólidos**



## Análisis del modelo cuadrático

**Resumen del modelo**

R	R cuadrado	R cuadrado corregida	Error típico de la estimación
1,000	1,000	,999	,107

La variable independiente es Número de evento.

**ANOVA**

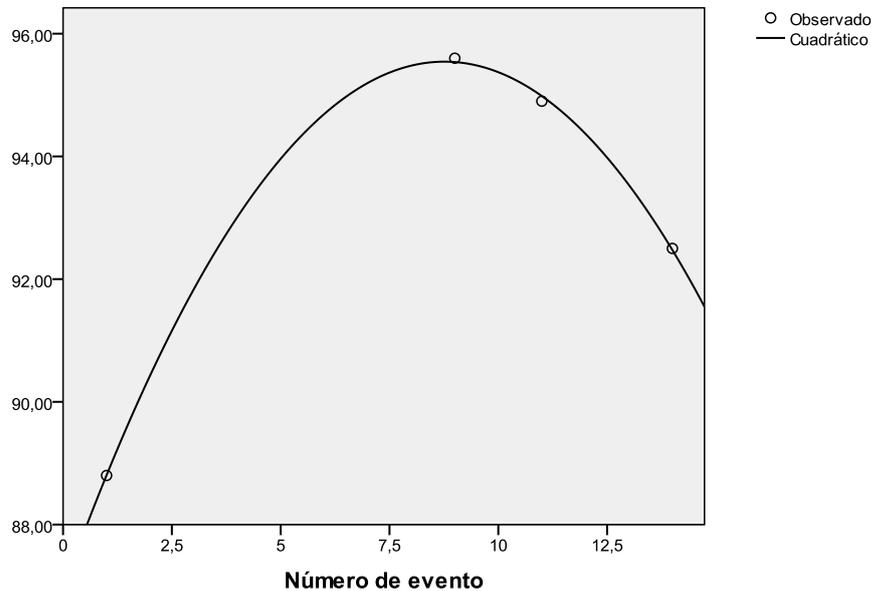
	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Regresión	28,238	2	14,119	1222,904	,020
Residual	,012	1	,012		
Total	28,250	3			

La variable independiente es Número de evento.

**Coefficientes**

	Coefficients no estandarizados		Coefficients estandarizados		
	B	Error típico	Beta	t	Sig.
	Número de evento	1,960	,045	3,552	43,416
Número de evento ** 2	-,112	,003	-2,963	-36,217	,018
(Constante)	86,956	,134		648,157	,001

### Eficiencia Sólidos



### Análisis de residuos del modelo cuadrático.

#### Resumen del procesamiento de los casos

	Casos					
	Válidos		Perdidos		Total	
	N	Porcentaje	N	Porcentaje	N	Porcentaje
Error Ef sólidos cuad	4	28,6%	10	71,4%	14	100,0%

#### Descriptivos

		Estadístico	Error típ.
Error Ef sólidos cuad	Media	,0000000	,03101835
	Intervalo de confianza para la media al 95%		
	Límite inferior	-,0987142	
	Límite superior	,0987142	
	Media recortada al 5%	,0011581	
	Mediana	,0104232	
	Varianza	,004	
	Desv. típ.	,06203670	

(Continúa en página siguiente)

**Descriptivos (continuación)**

	Estadístico	Error típ.
Mínimo	-,08339	
Máximo	,06254	
Rango	,14592	
Amplitud intercuartil	,11706	
Asimetría	-,889	1,014
Curtosis	,921	2,619

**Pruebas de normalidad**

	Kolmogorov-Smirnov <sup>a</sup>			Shapiro-Wilk		
	Estadístico	gl	Sig.	Estadístico	gl	Sig.
Error Ef sólidos cuad	,219	4	.	,961	4	,788

a. Corrección de la significación de Lilliefors

**Prueba de rachas**

	Efor Ef sólidos cuad
Valor de prueba <sup>a</sup>	,01042
Casos < Valor de prueba	2
Casos >= Valor de prueba	2
Casos en total	4
Número de rachas	4
Z	,612
Sig. asintót. (bilateral)	,540

a. Mediana

## Estimación curvilínea de eficiencia de depuración de aceites

### Descripción del modelo

	Nombre del modelo	MOD_1
Variable dependiente	1	Eficiencia Aceite
Ecuación	1	Lineal
	2	Logarítmica
	3	Inversa
	4	Cuadrático
	5	Cúbico
	6	Compuesto <sup>a</sup>
	7	Potencia <sup>a</sup>
	8	S <sup>a</sup>
	9	Crecimiento <sup>a</sup>
	10	Exponencial <sup>a</sup>
	Variable independiente	Número de evento
	Constante	Incluidos
	Variable cuyos valores etiquetan las observaciones en los gráficos	Sin especificar
	Tolerancia para la entrada de términos en ecuaciones	,0001

a. El modelo necesita todos los valores no perdidos para ser positivo.

### Resumen del procesamiento de los

#### casos

	N
Total de casos	14
Casos excluidos <sup>a</sup>	10
Casos pronosticados	0
Casos creados nuevos	0

a. Los casos con un valor perdido en cualquier variable se excluyen del análisis.

### Resumen del modelo y estimaciones de los parámetros

Variable dependiente: Eficiencia Aceite

Ecuación	Resumen del modelo					Estimaciones de los parámetros
	R cuadrado	F	gl1	gl2	Sig.	Constante
Lineal	,569	2,646	1	2	,245	
Logarítmica	,438	1,559	1	2	,338	
Inversa	,358	1,114	1	2	,402	
Cuadrático	,637	,879	2	1	,602	
Cúbico	1,000		3	0		
Compuesto	,569	2,637	1	2	,246	99,223
Potencia	,438	1,557	1	2	,338	98,765
S	,357	1,113	1	2	,402	4,561
Crecimiento	,569	2,637	1	2	,246	4,597
Exponencial	,569	2,637	1	2	,246	99,223

La variable independiente es Número de evento.

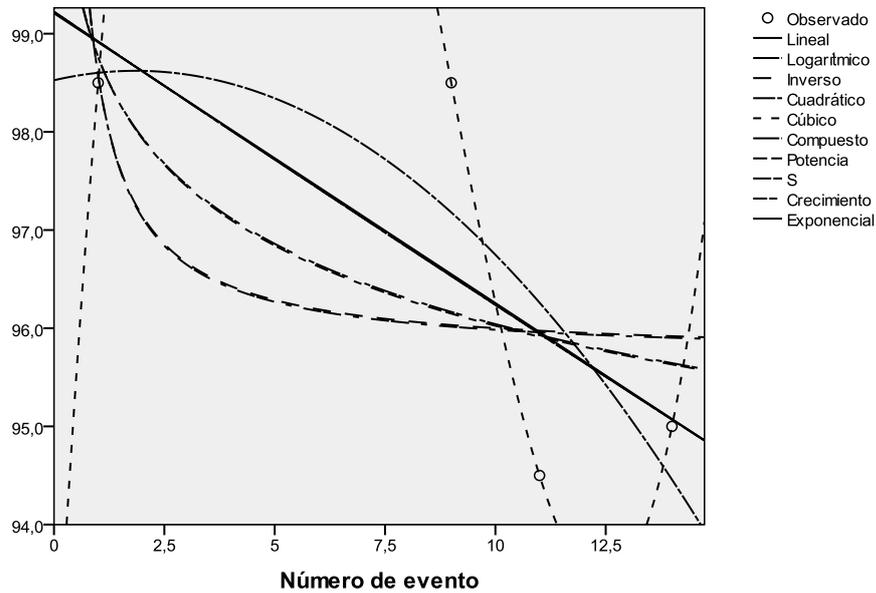
### Resumen del modelo y estimaciones de los parámetros

Variable dependiente: Eficiencia Aceite

Ecuación	Estimaciones de los parámetros			
	Constante	b1	b2	b3
Lineal	99,208	-,295		
Logarítmica	98,760	-1,181		
Inversa	95,714	2,860		
Cuadrático	98,526	,104	-,028	
Cúbico	91,877	7,797	-1,223	,049
Compuesto		,997		
Potencia		-,012		
S		,030		
Crecimiento		-,003		
Exponencial		-,003		

La variable independiente es Número de evento.

### Eficiencia Aceite



### Estimación curvilínea de concentración de aceites

#### Descripción del modelo

	Nombre del modelo	MOD_1
Variable dependiente	1	EMC Aceite
Ecuación	1	Lineal
	2	Logarítmica
	3	Inversa
	4	Cuadrático
	5	Cúbico
	6	Compuesto <sup>a</sup>
	7	Potencia <sup>a</sup>
	8	S <sup>a</sup>
	9	Crecimiento <sup>a</sup>
	10	Exponencial <sup>a</sup>

(Continúa en página siguiente)

**Descripción del modelo** (continuación)

Nombre del modelo	MOD_1
Variable independiente	Número de evento
Constante	Incluidos
Variable cuyos valores etiquetan las observaciones en los gráficos	Sin especificar
Tolerancia para la entrada de términos en ecuaciones	,0001

a. El modelo necesita todos los valores no perdidos para ser positivo.

**Resumen del procesamiento de los casos**

	N
Total de casos	14
Casos excluidos <sup>a</sup>	10
Casos pronosticados	0
Casos creados nuevos	0

a. Los casos con un valor perdido en cualquier variable se excluyen del análisis.

**Resumen del modelo y estimaciones de los parámetros**

Variable dependiente: EMC Aceite

Ecuación	Resumen del modelo					Estimaciones de los parámetros
	R cuadrado	F	gl1	gl2	Sig.	Constante
Lineal	,569	2,646	1	2	,245	
Logarítmica	,438	1,559	1	2	,338	
Inversa	,358	1,114	1	2	,402	
Cuadrático	,637	,879	2	1	,602	
Cúbico	1,000		3	0		

(Continúa en página siguiente)

**Resumen del modelo y estimaciones de los parámetros (continuación)**

Variable dependiente: EMC Aceite

Ecuación	Resumen del modelo					Estimaciones de los parámetros
	R cuadrado	F	gl1	gl2	Sig.	Constante
Compuesto	,586	2,836	1	2	,234	,235
Potencia	,445	1,604	1	2	,333	,274
S	,361	1,128	1	2	,399	-,274
Crecimiento	,586	2,836	1	2	,234	-1,450
Exponencial	,586	2,836	1	2	,234	,235

La variable independiente es Número de evento.

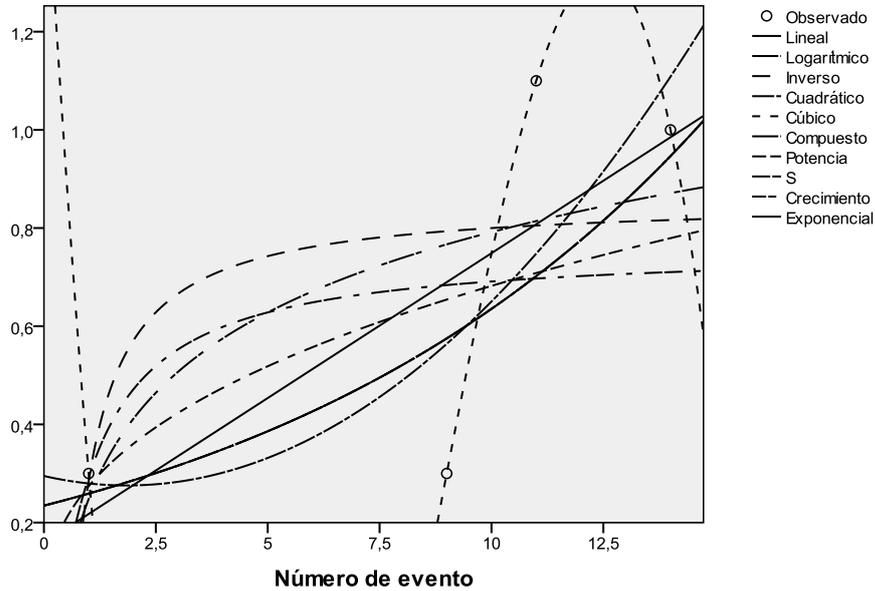
**Resumen del modelo y estimaciones de los parámetros**

Variable dependiente: EMC Aceite

Ecuación	Estimaciones de los parámetros			
	Constante	b1	b2	b3
Lineal	,158	,059		
Logarítmica	,248	,236		
Inversa	,857	-,572		
Cuadrático	,295	-,021	,006	
Cúbico	1,625	-1,559	,245	-,010
Compuesto		1,105		
Potencia		,396		
S		-,956		
Crecimiento		,100		
Exponencial		,100		

La variable independiente es Número de evento.

**EMC Aceite**



**Estimación curvilínea de desnivel con carga alta antes del desplazamiento del geotextil.**

**Resumen del modelo y estimaciones de los parámetros**

Variable dependiente: Altura de carga

Ecuación	Resumen del modelo					Estimaciones de los parámetros
	R cuadrado	F	gl1	gl2	Sig.	Constante
Lineal	,875	48,814	1	7	,000	
Logarítmica	,824	32,684	1	7	,001	
Inversa	,711	17,245	1	7	,004	
Cuadrático	,876	21,147	2	6	,002	
Cúbico	,910	16,812	3	5	,005	
Compuesto	,884	53,502	1	7	,000	1,190
Potencia	,879	50,956	1	7	,000	,518
S	,812	30,247	1	7	,001	2,286
Crecimiento	,884	53,502	1	7	,000	,174
Exponencial	,884	53,502	1	7	,000	1,190

La variable independiente es Número evento.

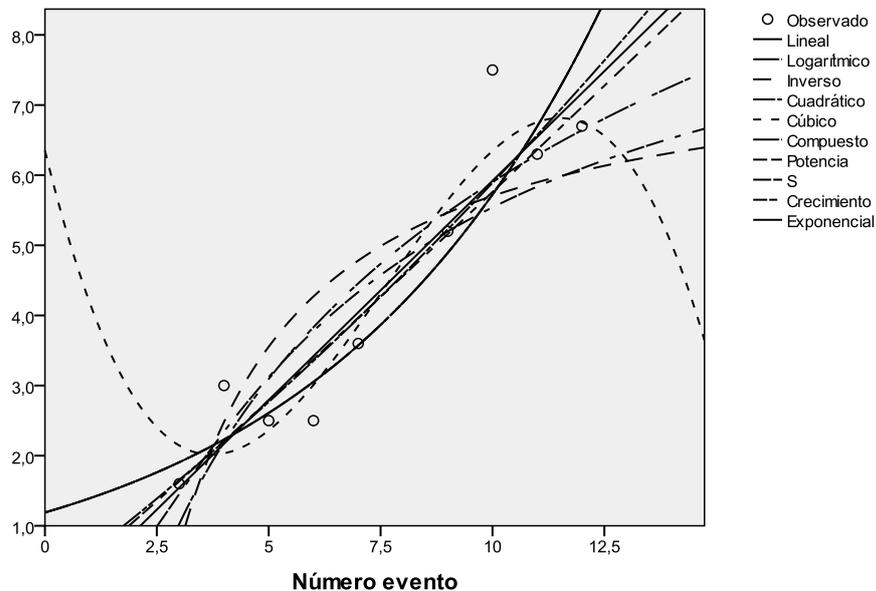
**Resumen del modelo y estimaciones de los parámetros**

Variable dependiente: Altura de carga

Ecuación	Estimaciones de los parámetros			
	Constante	b1	b2	b3
Lineal	-,333	,625		
Logarítmica	-3,429	4,052		
Inversa	7,853	-21,499		
Cuadrático	,130	,479	,010	
Cúbico	6,352	-2,613	,465	-,020
Compuesto		1,170		
Potencia		1,046		
S		-5,740		
Crecimiento		,157		
Exponencial		,157		

La variable independiente es Número evento.

**Altura de carga**



## Análisis del modelo lineal

**Resumen del procesamiento de los casos**

	Casos					
	Válidos		Perdidos		Total	
	N	Porcentaje	N	Porcentaje	N	Porcentaje
Altura de carga	9	64,3%	5	35,7%	14	100,0%

**Pruebas de normalidad**

	Kolmogorov-Smirnov <sup>a</sup>			Shapiro-Wilk		
	Estadístico	gl	Sig.	Estadístico	gl	Sig.
Altura de carga	,187	9	,200*	,914	9	,348

a. Corrección de la significación de Lilliefors

\*. Este es un límite inferior de la significación verdadera.

**Resumen del modelo**

R	R cuadrado	R cuadrado corregida	Error típico de la estimación
,935	,875	,857	,811

La variable independiente es Número evento.

**ANOVA**

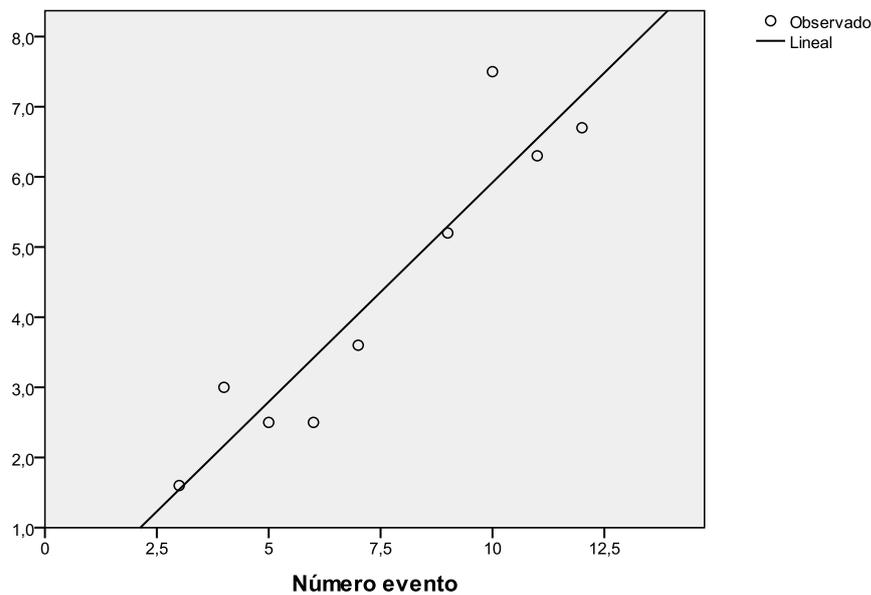
	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Regresión	32,146	1	32,146	48,814	,000
Residual	4,610	7	,659		
Total	36,756	8			

La variable independiente es Número evento.

### Coeficientes

	Coeficientes no estandarizados		Coeficientes estandarizados		
	B	Error típico	Beta	t	Sig.
Número evento	,625	,089	,935	6,987	,000
(Constante)	-,333	,719		-,463	,658

### Altura de carga



### Análisis de los residuos del modelo lineal

#### Resumen del procesamiento de los casos

	Casos					
	Válidos		Perdidos		Total	
	N	Porcentaje	N	Porcentaje	N	Porcentaje
Curva Lineal	9	64,3%	5	35,7%	14	100,0%

#### Pruebas de normalidad

	Kolmogorov-Smirnov <sup>a</sup>			Shapiro-Wilk		
	Estadístico	gl	Sig.	Estadístico	gl	Sig.
Curva Lineal	,248	9	,117	,878	9	,149

a. Corrección de la significación de Lilliefors

**Descriptivos**

		Estadístico	Error típ.
Error residuo cuadrática	Media	,0000000	,2518399
	Intervalo de confianza para la media al 95%	Límite inferior Límite superior	- ,5807440 ,5807440
	Media recortada al 5%	- ,0420297	
	Mediana	- ,2669602	
	Varianza	,571	
	Desv. típ.	,75551993	
	Mínimo	- ,85278	
	Máximo	1,60932	
	Rango	2,46210	
	Amplitud intercuartil	,85342	
	Asimetría	1,409	,717
	Curtosis	1,826	1,400

**Prueba de rachas**

	Curva Lineal
Valor de prueba <sup>a</sup>	- ,24541
Casos < Valor de prueba	4
Casos >= Valor de prueba	5
Casos en total	9
Número de rachas	4
Z	- ,683
Sig. asintót. (bilateral)	,495

a. Mediana

## Estimación curvilínea de desnivel con carga máxima después del desplazamiento del geotextil.

### Resumen del modelo y estimaciones de los parámetros

Variable dependiente: Altura de carga

Ecuación	Resumen del modelo					Estimaciones de los parámetros
	R cuadrado	F	gl1	gl2	Sig.	Constante
Lineal	,920	45,727	1	4	,002	
Logarítmica	,924	48,958	1	4	,002	
Inversa	,792	15,200	1	4	,018	
Cuadrático	,959	34,905	2	3	,008	
Cúbico	,990	66,323	3	2	,015	
Compuesto	,873	27,567	1	4	,006	1,791
Potencia	,943	66,600	1	4	,001	1,956
S	,869	26,546	1	4	,007	2,440
Crecimiento	,873	27,567	1	4	,006	,583
Exponencial	,873	27,567	1	4	,006	1,791

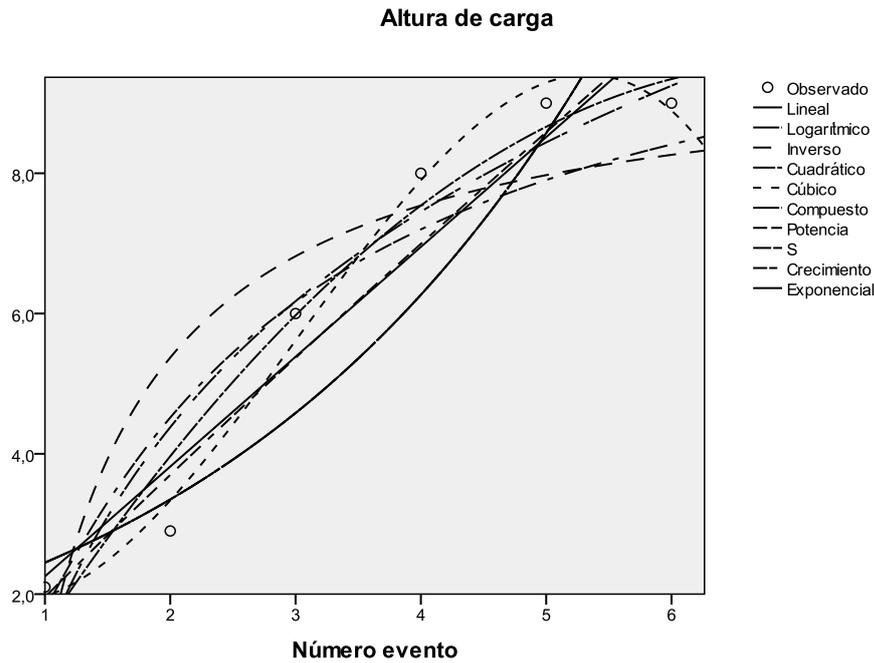
La variable independiente es Número evento.

### Resumen del modelo y estimaciones de los parámetros

Variable dependiente: Altura de carga

Ecuación	Estimaciones de los parámetros			
	Constante	b1	b2	b3
Lineal	,687	1,566		
Logarítmica	1,307	4,432		
Inversa	9,708	-8,673		
Cuadrático	-1,380	3,116	-,221	
Cúbico	2,400	-1,639	1,354	-,150
Compuesto		1,368		
Potencia		,919		
S		-1,865		
Crecimiento		,313		
Exponencial		,313		

La variable independiente es Número evento.



### Análisis del modelo cúbico.

#### Resumen del modelo y estimaciones de los parámetros

Variable dependiente: Altura de carga

Ecuación	Resumen del modelo				
	R cuadrado	F	gl1	gl2	Sig.
Cúbico	,990	66,323	3	2	,015

La variable independiente es Número evento.

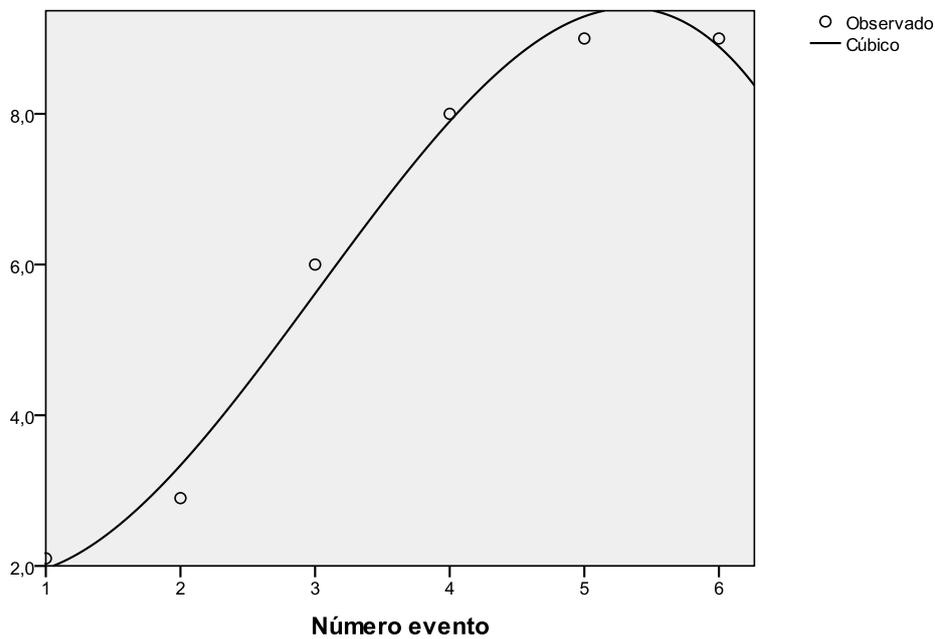
#### Resumen del modelo y estimaciones de los parámetros

Variable dependiente: Altura de carga

Ecuación	Estimaciones de los parámetros			
	Constante	b1	b2	b3
Cúbico	2,400	-1,639	1,354	-,150

La variable independiente es Número evento.

### Altura de carga



### Análisis de los residuos del modelo cúbico

#### Resumen del procesamiento de los casos

	Casos					
	Válidos		Perdidos		Total	
	N	Porcentaje	N	Porcentaje	N	Porcentaje
Curva Cúbica	6	100,0%	0	,0%	6	100,0%

#### Descriptivos

		Estadístico	Error típ.	
Error residuos cúbico	Media	,000000	,12440334	
	Intervalo de confianza para la media al 95%	Límite inferior	-,3197890	
		Límite superior	,3197890	
	Media recortada al 5%	,0027778		
	Mediana	,1035714		
	Varianza	,093		

(Continúa en página siguiente)

**Descriptivos (continuación)**

	Estadístico	Error típ.
Desv. típ.	,30472470	
Mínimo	-,43571	
Máximo	,38571	
Rango	,82143	
Amplitud intercuartil	,52679	
Asimetría	-,485	,845
Curtosis	-,884	1,741

**Pruebas de normalidad**

	Kolmogorov-Smirnov <sup>a</sup>			Shapiro-Wilk		
	Estadístico	gl	Sig.	Estadístico	gl	Sig.
Curva Cúbica	,295	6	,111	,907	6	,420

a. Corrección de la significación de Lilliefors

**Prueba de rachas**

	Curva Cúbica
Valor de prueba <sup>a</sup>	,10357
Casos < Valor de prueba	3
Casos >= Valor de prueba	3
Casos en total	6
Número de rachas	5
Z	,456
Sig. asintót. (bilateral)	,648

a. Mediana

**ANEXO VI**  
**RESULTADOS DEL ANÁLISIS**  
**ESTADÍSTICO CON SPSS DEL ENSAYO 3**



## Estimación curvilínea de la concentración de sólidos.

### Descripción del modelo

	Nombre del modelo	MOD_15
Variable dependiente	1	Concentración de sólidos
Ecuación	1	Lineal
	2	Logarítmica
	3	Inversa
	4	Cuadrático
	5	Cúbico
	6	Compuesto <sup>a</sup>
	7	Potencia <sup>a</sup>
	8	S <sup>a</sup>
	9	Crecimiento <sup>a</sup>
	10	Exponencial <sup>a</sup>
	Variable independiente	Número de evento
	Constante	Incluidos
	Variable cuyos valores etiquetan las observaciones en los gráficos	Sin especificar
	Tolerancia para la entrada de términos en ecuaciones	,0001

a. El modelo necesita todos los valores no perdidos para ser positivo.

### Resumen del procesamiento de los

#### casos

	N
Total de casos	14
Casos excluidos <sup>a</sup>	10
Casos pronosticados	0
Casos creados nuevos	0

a. Los casos con un valor perdido en cualquier variable se excluyen del análisis.

**Resumen del procesamiento de las variables**

	Variables	
	Dependiente	Independiente
	Concentración de sólidos	Número de evento
Número de valores positivos	4	14
Número de ceros	0	0
Número de valores negativos	0	0
Número de valores perdidos Perdidos definidos por el usuario	0	0
Perdidos del sistema	10	0

**Resumen del modelo y estimaciones de los parámetros**

Variable dependiente: Concentración de sólidos

Ecuación	Resumen del modelo					Estimaciones de los parámetros
	R cuadrado	F	gl1	gl2	Sig.	Constante
Lineal	,025	,052	1	2	,841	
Logarítmica	,018	,038	1	2	,864	
Inversa	,100	,222	1	2	,684	
Cuadrático	,991	54,146	2	1	,096	
Cúbico	1,000	,000	3	0		
Compuesto	,019	,038	1	2	,863	3,782
Potencia	,027	,056	1	2	,835	4,282
S	,122	,277	1	2	,651	1,311
Crecimiento	,019	,038	1	2	,863	1,330
Exponencial	,019	,038	1	2	,863	3,782

La variable independiente es Número de evento.

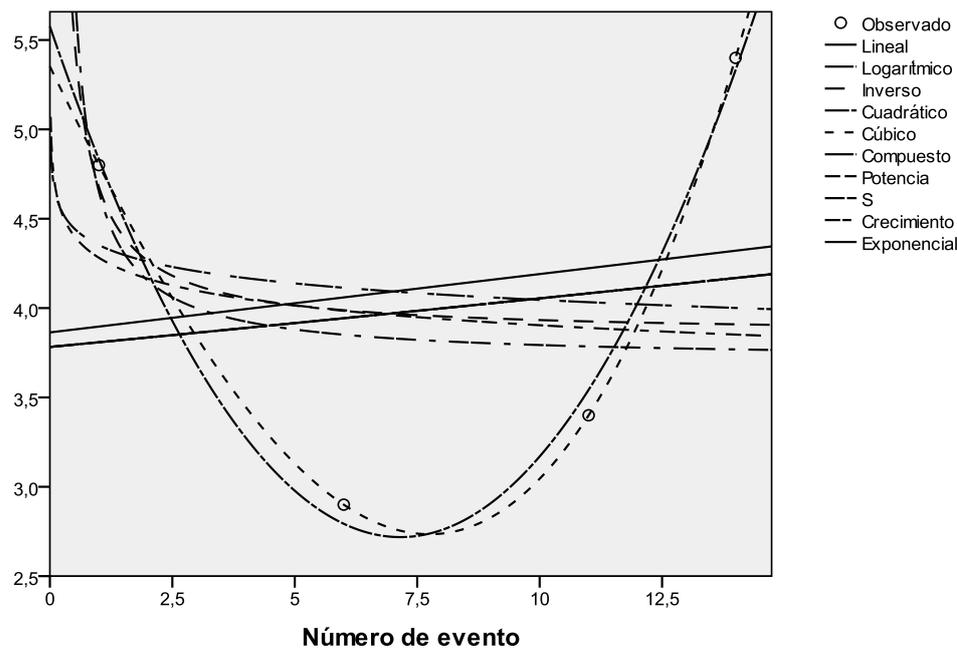
**Resumen del modelo y estimaciones de los parámetros**

Variable dependiente: Concentración de sólidos

Ecuación	Estimaciones de los parámetros			
	Constante	b1	b2	b3
Lineal	3,864	,033		
Logarítmica	4,352	-,133		
Inversa	3,850	,827		
Cuadrático	5,576	-,799	,056	
Cúbico	5,352	-,570	,016	,002
Compuesto		1,007		
Potencia		-,040		
S		,227		
Crecimiento		,007		
Exponencial		,007		

La variable independiente es Número de evento.

**Concentración de sólidos**



## Análisis de modelo cuadrático

Resumen del modelo

R	R cuadrado	R cuadrado corregida	Error típico de la estimación
,995	,991	,973	,194

La variable independiente es Número de evento.

ANOVA

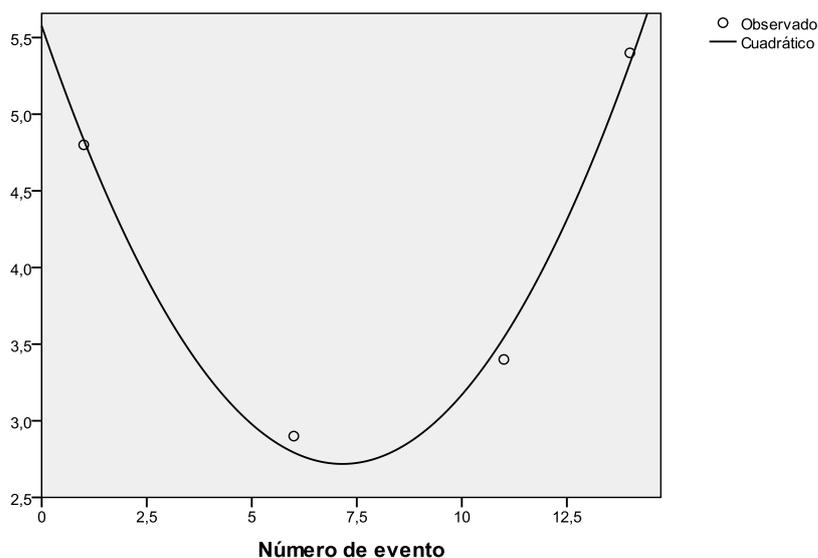
	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Regresión	4,070	2	2,035	54,146	,096
Residual	,038	1	,038		
Total	4,108	3			

La variable independiente es Número de evento.

Coefficientes

	Coefficients no estandarizados		Coefficients estandarizados		
	B	Error típico	Beta	t	Sig.
Número de evento	-,799	,083	-3,900	-9,591	,066
Número de evento ** 2	,056	,005	4,177	10,272	,062
(Constante)	5,576	,248		22,444	,028

Concentración de sólidos



## Análisis de residuos

Resumen del procesamiento de los casos

	Casos					
	Válidos		Perdidos		Total	
	N	Porcentaje	N	Porcentaje	N	Porcentaje
Error para EMC Sólidos caudrático	4	28,6%	10	71,4%	14	100,0%

Descriptivos

		Estadístico
Error para EMC Sólidos caudrático	Media	,0000000
	Intervalo de confianza para la media al 95%	
	Límite inferior	-,1781012
	Límite superior	,1781012
	Media recortada al 5%	,0019813
	Mediana	,0178314
	Varianza	,013
	Desv. típ.	,11192721
	Mínimo	-,14265
	Máximo	,10699
	Rango	,24964
	Amplitud intercuartil	,21261
	Asimetría	-,661
	Curtosis	-1,427

Descriptivos

		Error típ.
Error para EMC Sólidos caudrático	Media	,05596360
	Asimetría	1,014
	Curtosis	2,619

**Pruebas de normalidad**

	Kolmogorov-Smirnov <sup>a</sup>			Shapiro-Wilk		
	Estadístico	gl	Sig.	Estadístico	gl	Sig.
Error para EMC Sólidos caudrático	,230	4	.	,945	4	,685

a. Corrección de la significación de Lilliefors

**Prueba de rachas**

	Error para EMC Sólidos caudrático
Valor de prueba <sup>a</sup>	,01783
Casos < Valor de prueba	2
Casos >= Valor de prueba	2
Casos en total	4
Número de rachas	4
Z	,612
Sig. asintót. (bilateral)	,540

a. Mediana

**Estimación curvilínea de la eficiencia de depuración de sólidos.**

**Descripción del modelo**

	Nombre del modelo	MOD_17
Variable dependiente	1	Eficiencia sólidos
Ecuación	1	Lineal
	2	Logarítmica
	3	Inversa
	4	Cuadrático
	5	Cúbico
	6	Compuesto <sup>a</sup>
	7	Potencia <sup>a</sup>
	8	S <sup>a</sup>
	9	Crecimiento <sup>a</sup>
	10	Exponencial <sup>a</sup>

(Continúa en página siguiente)

**Descripción del modelo** (continuación)

Nombre del modelo	MOD_17
Variable independiente	Número de evento
Constante	Incluidos
Variable cuyos valores etiquetan las observaciones en los gráficos	Sin especificar
Tolerancia para la entrada de términos en ecuaciones	,0001

a. El modelo necesita todos los valores no perdidos para ser positivo.

**Resumen del procesamiento de los casos**

	N
Total de casos	14
Casos excluidos <sup>a</sup>	10
Casos pronosticados	0
Casos creados nuevos	0

a. Los casos con un valor perdido en cualquier variable se excluyen del análisis.

**Resumen del modelo y estimaciones de los parámetros**

Variable dependiente: Eficiencia sóidos

Ecuación	Resumen del modelo					Estimaciones de los parámetros
	R cuadrado	F	gl1	gl2	Sig.	Constante
Lineal	,027	,056	1	2	,836	
Logarítmica	,018	,036	1	2	,866	
Inversa	,100	,223	1	2	,683	
Cuadrático	,996	112,858	2	1	,066	
Cúbico	1,000	,000	3	0.		

(Continúa en página siguiente)

**Resumen del modelo y estimaciones de los parámetros (continuación)**

Variable dependiente: Eficiencia sólidos

Ecuación	Resumen del modelo					Estimaciones de los parámetros
	R cuadrado	F	gl1	gl2	Sig.	Constante
Compuesto	,027	,056	1	2	,835	98,088
Potencia	,018	,036	1	2	,867	97,834
S	,100	,222	1	2	,684	4,586
Crecimiento	,027	,056	1	2	,835	4,586
Exponencial	,027	,056	1	2	,835	98,088

La variable independiente es Número de evento.

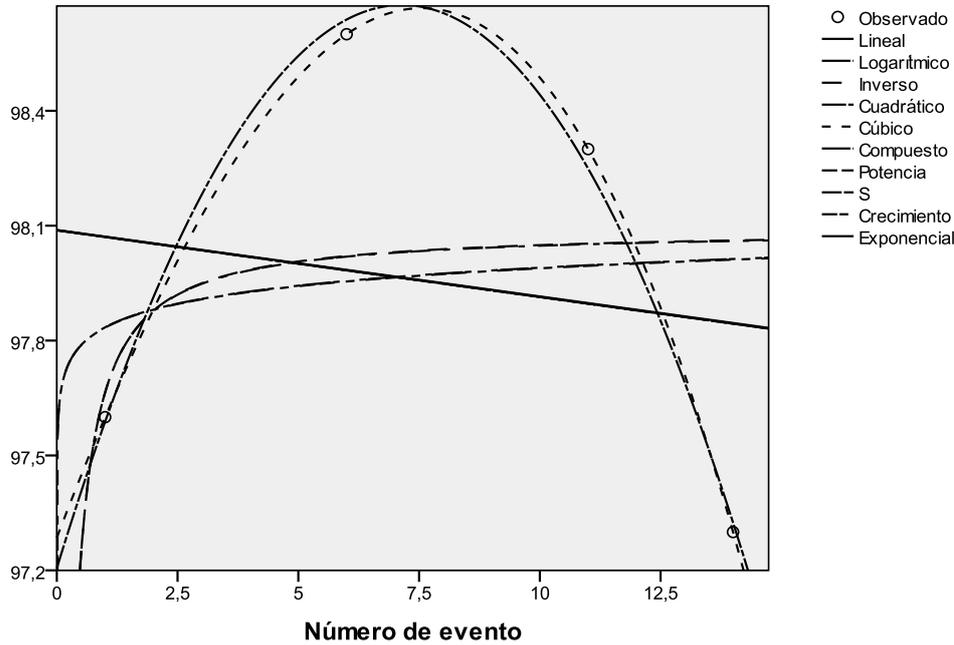
**Resumen del modelo y estimaciones de los parámetros**

Variable dependiente: Eficiencia sólidos

Ecuación	Estimaciones de los parámetros			
	Constante	b1	b2	b3
Lineal	98,089	-,017		
Logarítmica	97,835	,068		
Inversa	98,092	-,427		
Cuadrático	97,205	,412	-,029	
Cúbico	97,285	,330	-,015	,000
Compuesto		1,000		
Potencia		,001		
S		-,004		
Crecimiento		,000		
Exponencial		,000		

La variable independiente es Número de evento.

### Eficiencia sóidos



### Análisis de modelo cuadrático

#### Resumen del modelo

R	R cuadrado	R cuadrado corregida	Error típico de la estimación
,998	,996	,987	,069

La variable independiente es Número de evento.

#### ANOVA

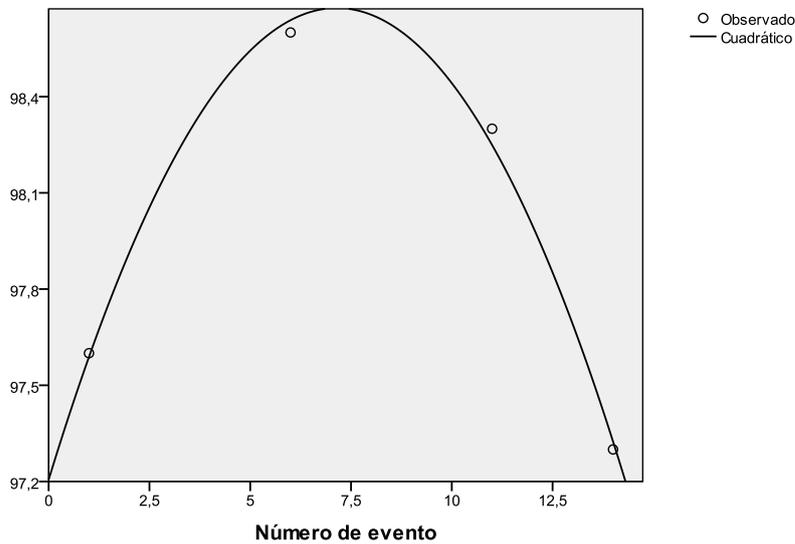
	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Regresión	1,085	2	,543	112,858	,066
Residual	,005	1	,005		
Total	1,090	3			

La variable independiente es Número de evento.

**Coefficientes**

	Coefficientes no estandarizados		Coefficientes estandarizados		
	B	Error típico	Beta	t	Sig.
Número de evento	,412	,030	3,902	13,820	,046
Número de evento ** 2	-,029	,002	-4,184	-14,818	,043
(Constante)	97,205	,089		1094,013	,001

**Eficiencia sólidos**



**Análisis de residuos**

**Descriptivos**

	Estadístico	Error típ.
Error para Ef Sólidos Media cuadrático	,0000000	,02001618
Intervalo de confianza para la media al 95%		
Límite inferior	-,0637004	
Límite superior	,0637004	
Media recortada al 5%	-,0007086	
Mediana	-,0063777	

(Continua en página siguiente)

**Descriptivos (continuación)**

	Estadístico	Error típ.
Varianza	,002	
Desv. típ.	,04003236	
Mínimo	-,03827	
Máximo	,05102	
Rango	,08929	
Amplitud intercuartil	,07604	
Asimetría	,661	1,014
Curtosis	-1,427	2,619

**Pruebas de normalidad**

	Kolmogorov-Smirnov <sup>a</sup>			Shapiro-Wilk		
	Estadístico	gl	Sig.	Estadístico	gl	Sig.
Error para Ef Sólidos cuadrático	,230	4	.	,945	4	,685

a. Corrección de la significación de Lilliefors

**Prueba de rachas**

	Error para Ef Sólidos cuadrático
Valor de prueba <sup>a</sup>	-,00638
Casos < Valor de prueba	2
Casos >= Valor de prueba	2
Casos en total	4
Número de rachas	4
Z	,612
Sig. asintót. (bilateral)	,540

a. Mediana

## Estimación curvilínea de la concentración de aceites.

### Descripción del modelo

	Nombre del modelo	MOD_19
Variable dependiente	1	Concentración de aceites
Ecuación	1	Lineal
	2	Logarítmica
	3	Inversa
	4	Cuadrático
	5	Cúbico
	6	Compuesto <sup>a</sup>
	7	Potencia <sup>a</sup>
	8	S <sup>a</sup>
	9	Crecimiento <sup>a</sup>
	10	Exponencial <sup>a</sup>
	Variable independiente	Número de evento
	Constante	Incluidos
	Variable cuyos valores etiquetan las observaciones en los gráficos	Sin especificar
	Tolerancia para la entrada de términos en ecuaciones	,0001

a. El modelo necesita todos los valores no perdidos para ser positivo.

### Resumen del procesamiento de los

#### casos

	N
Total de casos	14
Casos excluidos <sup>a</sup>	10
Casos pronosticados	0
Casos creados nuevos	0

a. Los casos con un valor perdido en cualquier variable se excluyen del análisis.

### Resumen del modelo y estimaciones de los parámetros

Variable dependiente: Concentración de aceites

Ecuación	Resumen del modelo					Estimaciones de los parámetros
	R cuadrado	F	gl1	gl2	Sig.	Constante
Lineal	,409	1,386	1	2	,360	
Logarítmica	,706	4,797	1	2	,160	
Inversa	,872	13,587	1	2	,066	
Cuadrático	,875	3,495	2	1	,354	
Cúbico	1,000		3	0		
Compuesto	,197	,491	1	2	,556	,956
Potencia	,472	1,788	1	2	,313	1,214
S	,673	4,125	1	2	,179	-,858
Crecimiento	,197	,491	1	2	,556	-,045
Exponencial	,197	,491	1	2	,556	,956

La variable independiente es Número de evento.

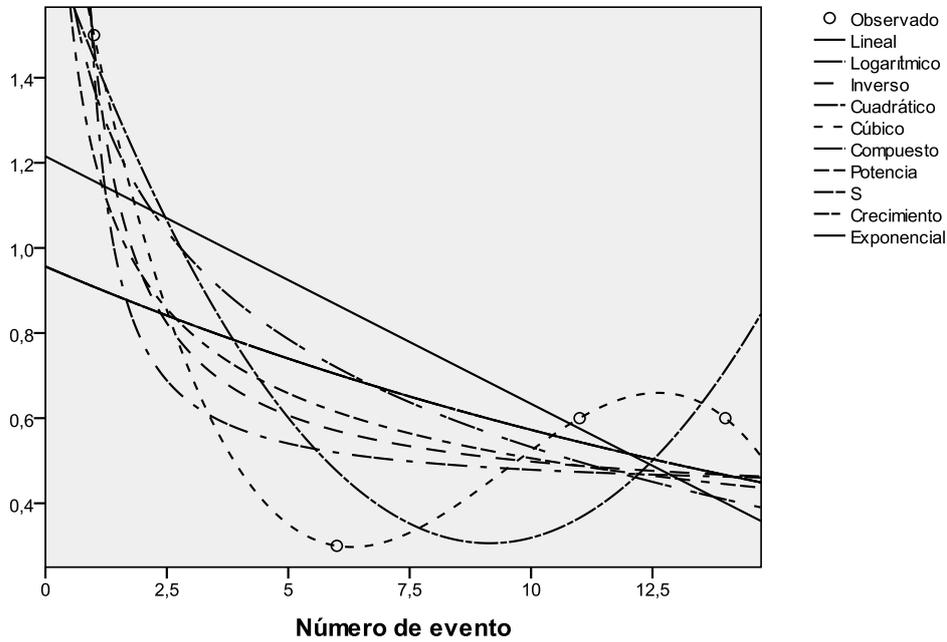
### Resumen del modelo y estimaciones de los parámetros

Variable dependiente: Concentración de aceites

Ecuación	Estimaciones de los parámetros			
	Constante	b1	b2	b3
Lineal	1,215	-,058		
Logarítmica	1,375	-,366		
Inversa	,389	1,085		
Cuadrático	1,743	-,314	,017	
Cúbico	2,110	-,689	,082	-,003
Compuesto		,950		
Potencia		-,380		
S		1,212		
Crecimiento		-,051		
Exponencial		-,051		

La variable independiente es Número de evento.

### Concentración de aceites



### Análisis modelo inverso

Resumen del modelo

R	R cuadrado	R cuadrado corregida	Error típico de la estimación
,934	,872	,808	,228

La variable independiente es Número de evento.

ANOVA

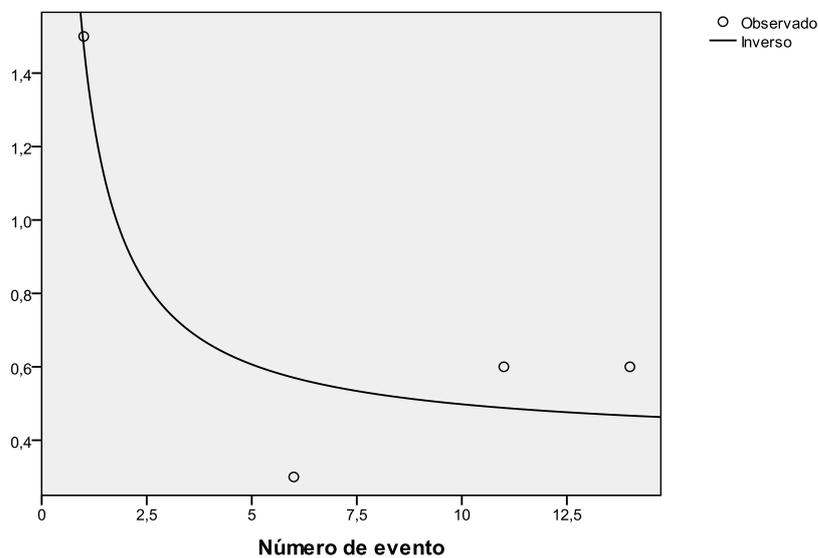
	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Regresión	,706	1	,706	13,587	,066
Residual	,104	2	,052		
Total	,810	3			

La variable independiente es Número de evento.

**Coefficientes**

	Coefficientes no estandarizados		Coefficientes estandarizados		
	B	Error típico	Beta	t	Sig.
1 / Número de evento	1,085	,294	,934	3,686	,066
(Constante)	,389	,150		2,593	,122

**Concentración de aceites**



**Análisis residuos**

**Resumen del procesamiento de los casos**

	Casos					
	Válidos		Perdidos		Total	
	N	Porcentaje	N	Porcentaje	N	Porcentaje
Error para EMCaceite inverso	4	28,6%	10	71,4%	14	100,0%

**Descriptivos**

			Estadístico
Error para inverso	EMCAceite	Media	,0000000
		Intervalo de confianza para la Límite inferior media al 95%	-,2961739
		Límite superior	,2961739
		Media recortada al 5%	,0076264
		Mediana	,0686373
		Varianza	,035
		Desv. típ.	,18612972
		Mínimo	-,27031
		Máximo	,13304
		Rango	,40335
		Amplitud intercuartil	,32414
		Asimetría	-1,652
		Curtosis	2,634

**Pruebas de normalidad**

	Kolmogorov-Smirnov <sup>a</sup>			Shapiro-Wilk		
	Estadístico	gl	Sig.	Estadístico	gl	Sig.
Error para inverso	,304	4	.	,818	4	,139

a. Corrección de la significación de Lilliefors

**Prueba de rachas**

	Error para EMCAceite inverso
Valor de prueba <sup>a</sup>	,06864
Casos < Valor de prueba	2
Casos >= Valor de prueba	2

(Continúa en página siguiente)

**Prueba de rachas (continuación)**

	Error para EMCAceite inverso
Casos en total	4
Número de rachas	2
Z	-,612
Sig. asintót. (bilateral)	,540

a. Mediana

**Estimación curvilínea de la eficiencia de depuración de aceites.**

**Descripción del modelo**

	Nombre del modelo	MOD_21
Variable dependiente	1	Eficiencia Aceites
Ecuación	1	Lineal
	2	Logarítmica
	3	Inversa
	4	Cuadrático
	5	Cúbico
	6	Compuesto <sup>a</sup>
	7	Potencia <sup>a</sup>
	8	S <sup>a</sup>
	9	Crecimiento <sup>a</sup>
	10	Exponencial <sup>a</sup>
	Variable independiente	Número de evento
	Constante	Incluidos
	Variable cuyos valores etiquetan las observaciones en los gráficos	Sin especificar
	Tolerancia para la entrada de términos en ecuaciones	,0001

a. El modelo necesita todos los valores no perdidos para ser positivo.

**Resumen del procesamiento de los casos**

	N
Total de casos	14
Casos excluidos <sup>a</sup>	10
Casos pronosticados	0
Casos creados nuevos	0

a. Los casos con un valor perdido en cualquier variable se excluyen del análisis.

**Resumen del procesamiento de las variables**

	Variables	
	Dependiente	Independiente
	Eficiencia Aceites	Número de evento
Número de valores positivos	4	14
Número de ceros	0	0
Número de valores negativos	0	0
Número de valores perdidos Perdidos definidos por el usuario	0	0
Perdidos del sistema	10	0

**Resumen del modelo y estimaciones de los parámetros**

Variable dependiente: Eficiencia Aceites

Ecuación	Resumen del modelo					Estimaciones de los parámetros
	R cuadrado	F	gl1	gl2	Sig.	Constante
Lineal	,409	1,386	1	2	,360	
Logarítmica	,706	4,797	1	2	,160	
Inversa	,872	13,587	1	2	,066	

(Continúa en página siguiente)

**Resumen del modelo y estimaciones de los parámetros (continuación)**

Variable dependiente: Eficiencia Aceites

Ecuación	Resumen del modelo					Estimaciones de los parámetros
	R cuadrado	F	gl1	gl2	Sig.	Constante
Cuadrático	,875	3,495	2	1	,354	
Cúbico	1,000		3	0		
Compuesto	,416	1,426	1	2	,355	93,881
Potencia	,712	4,952	1	2	,156	93,103
S	,877	14,198	1	2	,064	4,586
Crecimiento	,416	1,426	1	2	,355	4,542
Exponencial	,416	1,426	1	2	,355	93,881

La variable independiente es Número de evento.

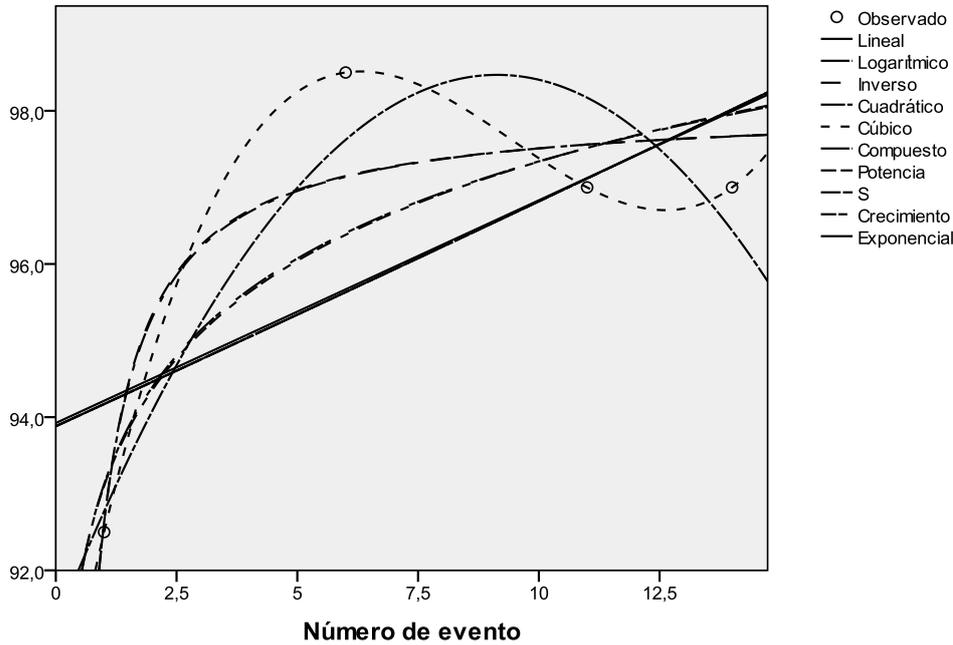
**Resumen del modelo y estimaciones de los parámetros**

Variable dependiente: Eficiencia Aceites

Ecuación	Estimaciones de los parámetros			
	Constante	b1	b2	b3
Lineal	93,923	,291		
Logarítmica	93,126	1,830		
Inversa	98,053	-5,426		
Cuadrático	91,284	1,572	-,086	
Cúbico	89,448	3,447	-,410	,014
Compuesto		1,003		
Potencia		,019		
S		-,057		
Crecimiento		,003		
Exponencial		,003		

La variable independiente es Número de evento.

### Eficiencia Aceites



### Análisis modelo S

Resumen del modelo

R	R cuadrado	R cuadrado corregida	Error típico de la estimación
,936	,877	,815	,012

La variable independiente es Número de evento.

ANOVA

	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Regresión	,002	1	,002	14,198	,064
Residual	,000	2	,000		
Total	,002	3			

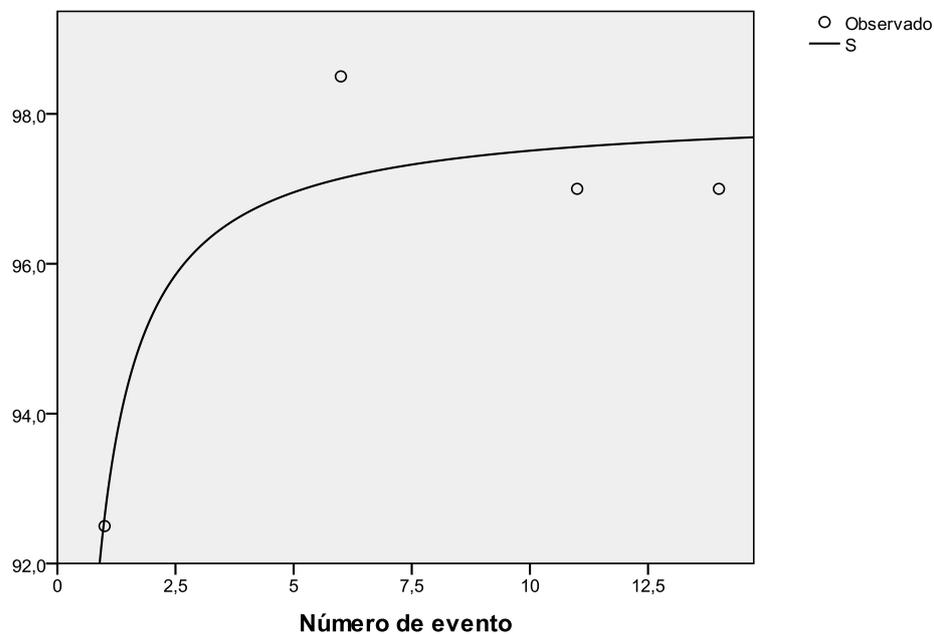
La variable independiente es Número de evento.

**Coeficientes**

	Coeficientes no estandarizados		Coeficientes estandarizados		
	B	Error típico	Beta	t	Sig.
1 / Número de evento	-,057	,015	-,936	-3,768	,064
(Constante)	4,586	,008		592,719	,000

La variable dependiente es ln(Eficiencia Aceites).

**Eficiencia Aceites**



**Análisis de residuos**

**Resumen del procesamiento de los casos**

	Casos					
	Válidos		Perdidos		Total	
	N	Porcentaje	N	Porcentaje	N	Porcentaje
Error para EfAceite S	4	28,6%	10	71,4%	14	100,0%

### Descriptivos

		Estadístico	Error típ.
Error para EfAceite S	Media	,0033219	,46805200
Intervalo de confianza para la media al 95%	Límite inferior	-1,4862284	
	Límite superior	1,4928723	
	Media recortada al 5%	-,0348524	
	Mediana	-,3402470	
	Varianza	,876	
	Desv. típ.	,93610400	
	Mínimo	-,66814	
	Máximo	1,36192	
	Rango	2,03007	
	Amplitud intercuartil	1,63217	
	Asimetría	1,646	1,014
	Curtosis	2,608	2,619

### Pruebas de normalidad

	Kolmogorov-Smirnov <sup>a</sup>			Shapiro-Wilk		
	Estadístico	gl	Sig.	Estadístico	gl	Sig.
Error para EfAceite S	,303	4	.	,820	4	,143

a. Corrección de la significación de Lilliefors

## Análisis modelo inverso

### Resumen del modelo

R	R cuadrado	R cuadrado corregida	Error típico de la estimación
,934	,872	,808	1,140

La variable independiente es Número de evento.

**ANOVA**

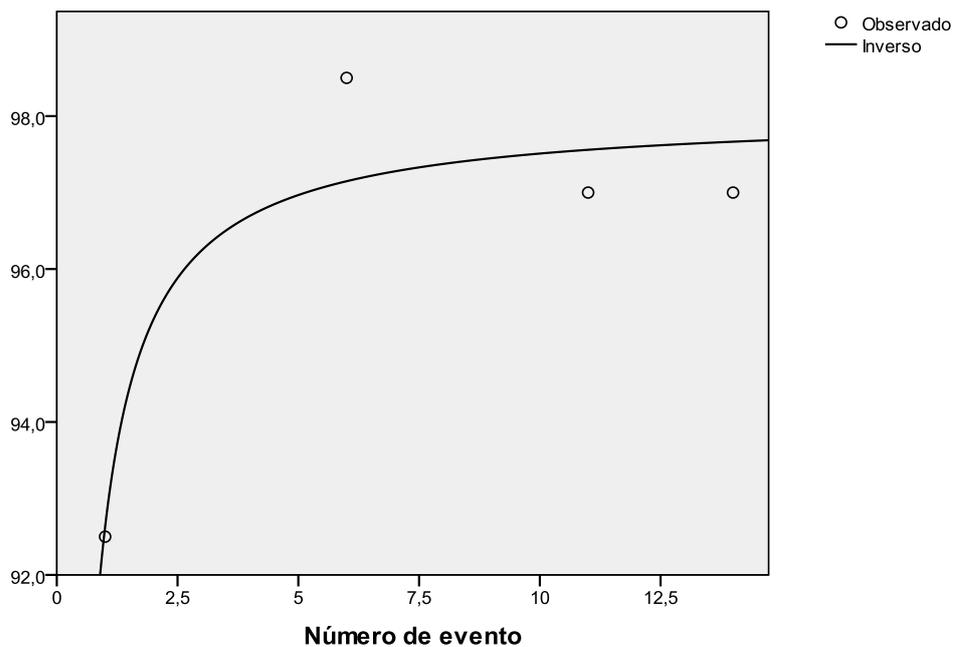
	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Regresión	17,652	1	17,652	13,587	,066
Residual	2,598	2	1,299		
Total	20,250	3			

La variable independiente es Número de evento.

**Coefficientes**

	Coeficientes no estandarizados		Coeficientes estandarizados		
	B	Error típico	Beta	t	Sig.
1 / Número de evento	-5,426	1,472	-,934	-3,686	,066
(Constante)	98,053	,751		130,565	,000

**Eficiencia Aceites**



## Análisis de residuos

**Resumen del procesamiento de los casos**

	Casos					
	Válidos		Perdidos		Total	
	N	Porcentaje	N	Porcentaje	N	Porcentaje
Error para Ef Aceite inverso	4	28,6%	10	71,4%	14	100,0%

**Descriptivos**

		Estadístico
Error para Ef Aceite inverso	Media	,0000000
Intervalo de confianza para la media al 95%	Límite inferior	-1,4808696
	Límite superior	1,4808696
	Media recortada al 5%	-,0381319
	Mediana	-,3431867
	Varianza	,866
	Desv. típ.	,93064859
	Mínimo	-,66519
	Máximo	1,35156
	Rango	2,01675
	Amplitud intercuartil	1,62071
	Asimetría	1,652
	Curtosis	2,634

**Descriptivos**

		Error típ.
Error para Ef Aceite inverso	Media	,46532430
	Asimetría	1,014
	Curtosis	2,619

**Pruebas de normalidad**

	Kolmogorov-Smirnov <sup>a</sup>			Shapiro-Wilk		
	Estadístico	gl	Sig.	Estadístico	gl	Sig.
Error para Ef Aceite inverso	,304	4	.	,818	4	,139

a. Corrección de la significación de Lilliefors

**Prueba de rachas**

	Error para Ef Aceite inverso
Valor de prueba <sup>a</sup>	-,34319
Casos < Valor de prueba	2
Casos >= Valor de prueba	2
Casos en total	4
Número de rachas	2
Z	-,612
Sig. asintót. (bilateral)	,540

a. Mediana

**Estimación curvilínea del desnivel de agua entre zona de tapón hidráulica y zona sobre sistema de filtrado, con carga media antes del desplazamiento del sistema de filtrado.**

**Descripción del modelo**

	Nombre del modelo	
		MOD_1
Variable dependiente	1	Altura de carga
Ecuación	1	Lineal
	2	Logarítmica
	3	Inversa
	4	Cuadrático

(Continúa en página siguiente)

**Descripción del modelo (continuación)**

Nombre del modelo	MOD_1
5	Cúbico
6	Compuesto <sup>a</sup>
7	Potencia <sup>a</sup>
8	S <sup>a</sup>
9	Crecimiento <sup>a</sup>
10	Exponencial <sup>a</sup>
Variable independiente	Número evento
Constante	Incluidos
Variable cuyos valores etiquetan las observaciones en los gráficos	Sin especificar
Tolerancia para la entrada de términos en ecuaciones	,0001

a. El modelo necesita todos los valores no perdidos para ser positivo.

**Resumen del procesamiento de los  
casos**

	N
Total de casos	14
Casos excluidos <sup>a</sup>	0
Casos pronosticados	0
Casos creados nuevos	0

a. Los casos con un valor perdido en cualquier variable se excluyen del análisis.

**Resumen del procesamiento de las variables**

	Variables	
	Dependiente	Independiente
	Altura de carga	Número evento
Número de valores positivos	14	14
Número de ceros	0	0
Número de valores negativos	0	0
Número de valores perdidos Perdidos definidos por el usuario	0	0
Perdidos del sistema	0	0

**Resumen del modelo y estimaciones de los parámetros**

Variable dependiente:Altura de carga

Ecuación	Resumen del modelo					Estimaciones de los parámetros
	R cuadrado	F	gl1	gl2	Sig.	Constante
Lineal	,892	98,830	1	12	,000	
Logarítmica	,691	26,839	1	12	,000	
Inversa	,364	6,883	1	12	,022	
Cuadrático	,905	52,124	2	11	,000	
Cúbico	,949	62,613	3	10	,000	
Compuesto	,924	144,963	1	12	,000	2,153
Potencia	,761	38,248	1	12	,000	1,857
S	,425	8,855	1	12	,012	1,895
Crecimiento	,924	144,963	1	12	,000	,767
Exponencial	,924	144,963	1	12	,000	2,153

La variable independiente es Número evento.

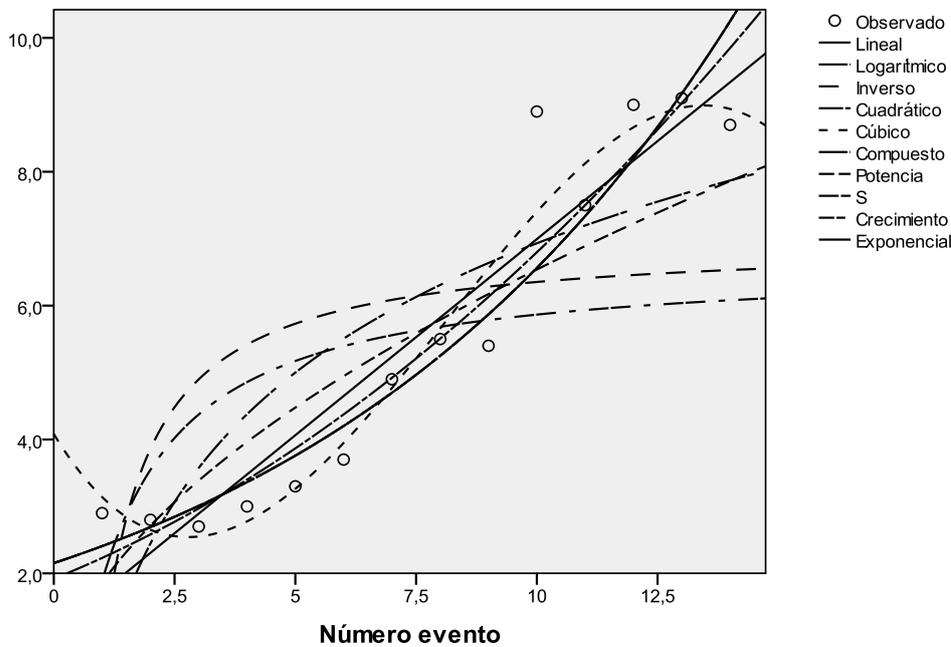
**Resumen del modelo y estimaciones de los parámetros**

Variable dependiente: Altura de carga

Ecuación	Estimaciones de los parámetros			
	Constante	b1	b2	b3
Lineal	1,134	,586		
Logarítmica	,513	2,787		
Inversa	6,977	-6,237		
Cuadrático	1,920	,291	,020	
Cúbico	4,082	-1,189	,258	-,011
Compuesto		1,118		
Potencia		,547		
S		-1,258		
Crecimiento		,111		
Exponencial		,111		

La variable independiente es Número evento.

**Altura de carga**



## Análisis modelo cúbico

**Resumen del modelo**

R	R cuadrado	R cuadrado corregida	Error típico de la estimación
,974	,949	,934	,665

La variable independiente es Número evento.

**ANOVA**

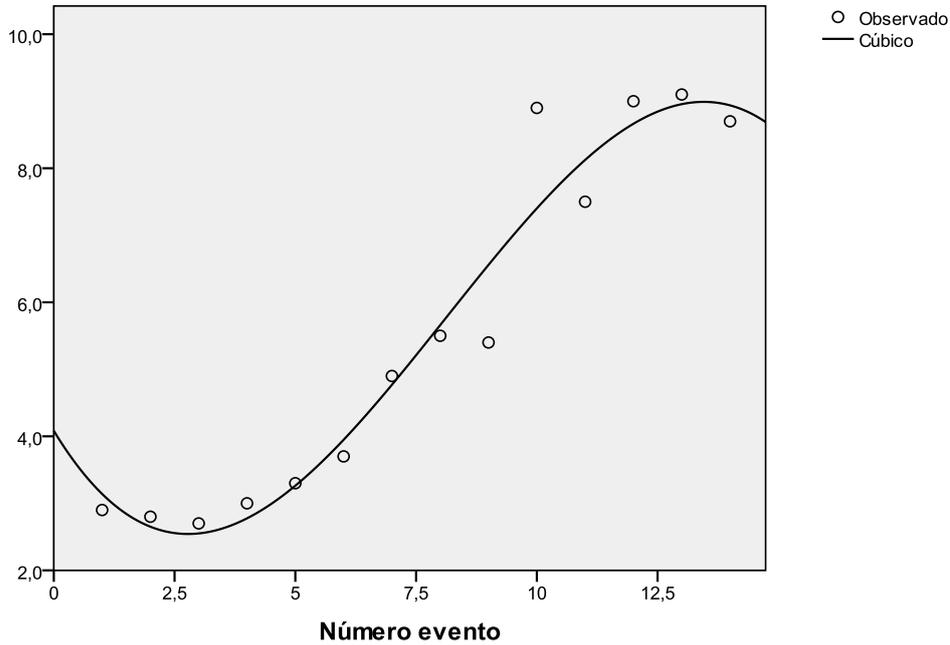
	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Regresión	83,161	3	27,720	62,613	,000
Residual	4,427	10	,443		
Total	87,589	13			

La variable independiente es Número evento.

**Coefficientes**

	Coefficients no estandarizados		Coefficients estandarizados		
	B	Error típico	Beta	t	Sig.
Número evento	-1,189	,532	-1,917	-2,236	,049
Número evento ** 2	,258	,081	6,415	3,188	,010
Número evento ** 3	-,011	,004	-3,654	-2,980	,014
(Constante)	4,082	,954		4,278	,002

### Altura de carga



### Análisis de residuos

#### Resumen del procesamiento de los casos

	Casos					
	Válidos		Perdidos		Total	
	N	Porcentaje	N	Porcentaje	N	Porcentaje
Error modelo cúbico	14	100,0%	0	,0%	14	100,0%

#### Descriptivos

		Estadístico	Error típ.
Error modelo cúbico	Media	,0000000	,15596668
Intervalo de confianza para la media al 95%			
	Límite inferior	-,3369455	
	Límite superior	,3369455	
	Media recortada al 5%	-,0189059	
	Mediana	,0840784	

(Continúa en página siguiente)

**Descriptivos** (continuación)

	Estadístico	Error típ.
Varianza	,341	
Desv. típ.	,58357388	
Mínimo	-1,15856	
Máximo	1,49887	
Rango	2,65743	
Amplitud intercuartil	,41021	
Asimetría	,715	,597
Curtosis	3,575	1,154

**Pruebas de normalidad**

	Kolmogorov-Smirnov <sup>a</sup>			Shapiro-Wilk		
	Estadístico	gl	Sig.	Estadístico	gl	Sig.
Error modelo cúbico	,211	14	,093	,879	14	,057

a. Corrección de la significación de Lilliefors

**Prueba de rachas**

	Error modelo cúbico
Valor de prueba <sup>a</sup>	,08408
Casos < Valor de prueba	7
Casos >= Valor de prueba	7
Casos en total	14
Número de rachas	9
Z	,278
Sig. asintót. (bilateral)	,781

a. Mediana

## Estimación curvilínea del desnivel de agua entre zona de tapón hidráulica y zona sobre sistema de filtrado, con carga media después del desplazamiento del sistema de filtrado.

### Descripción del modelo

	Nombre del modelo	MOD_3
Variable dependiente	1	Altura de carga
Ecuación	1	Lineal
	2	Logarítmica
	3	Inversa
	4	Cuadrático
	5	Cúbico
	6	Compuesto <sup>a</sup>
	7	Potencia <sup>a</sup>
	8	S <sup>a</sup>
	9	Crecimiento <sup>a</sup>
	10	Exponencial <sup>a</sup>
	Variable independiente	Número evento
	Constante	Incluidos
	Variable cuyos valores etiquetan las observaciones en los gráficos	Sin especificar
	Tolerancia para la entrada de términos en ecuaciones	,0001

a. El modelo necesita todos los valores no perdidos para ser positivo.

### Resumen del procesamiento de los

#### casos

	N
Total de casos	7
Casos excluidos <sup>a</sup>	0
Casos pronosticados	0
Casos creados nuevos	0

a. Los casos con un valor perdido en cualquier variable se excluyen del análisis.

**Resumen del modelo y estimaciones de los parámetros**

Variable dependiente: Altura de carga

Ecuación	Resumen del modelo					Estimaciones de los parámetros
	R cuadrado	F	gl1	gl2	Sig.	Constante
Lineal	,789	18,641	1	5	,008	
Logarítmica	,818	22,462	1	5	,005	
Inversa	,845	27,217	1	5	,003	
Cuadrático	,910	20,308	2	4	,008	
Cúbico	,910	20,308	2	4	,008	
Compuesto	,703	11,810	1	5	,019	,089
Potencia	,741	14,289	1	5	,013	6,239E-5
S	,778	17,476	1	5	,009	5,233
Crecimiento	,703	11,810	1	5	,019	-2,414
Exponencial	,703	11,810	1	5	,019	,089

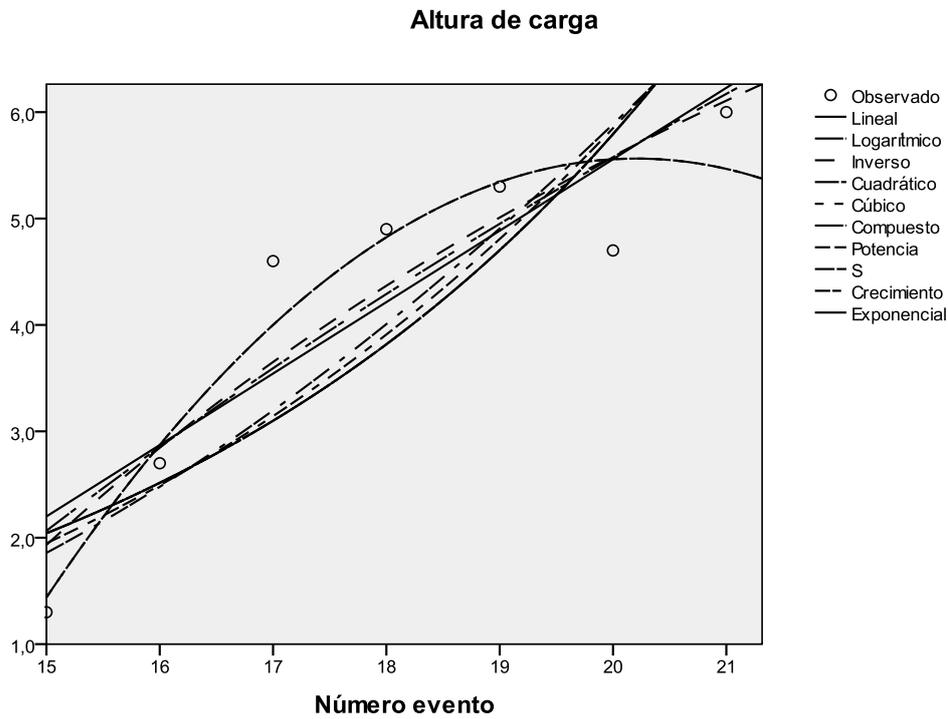
La variable independiente es Número evento.

**Resumen del modelo y estimaciones de los parámetros**

Variable dependiente: Altura de carga

Ecuación	Estimaciones de los parámetros			
	Constante	b1	b2	b3
Lineal	-7,871	,671		
Logarítmica	-30,988	12,205		
Inversa	16,549	-219,256		
Cuadrático	-56,633	6,157	-,152	
Cúbico	-56,633	6,157	-,152	,000
Compuesto		1,232		
Potencia		3,822		
S		-69,205		
Crecimiento		,209		
Exponencial		,209		

La variable independiente es Número evento.



### Análisis modelo cúbico

**Resumen del modelo**

R	R cuadrado	R cuadrado corregida	Error típico de la estimación
,954	,910	,866	,599

La variable independiente es Número evento.

**ANOVA**

	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Regresión	14,573	2	7,287	20,308	,008
Residual	1,435	4	,359		
Total	16,009	6			

La variable independiente es Número evento.

**Coefficientes**

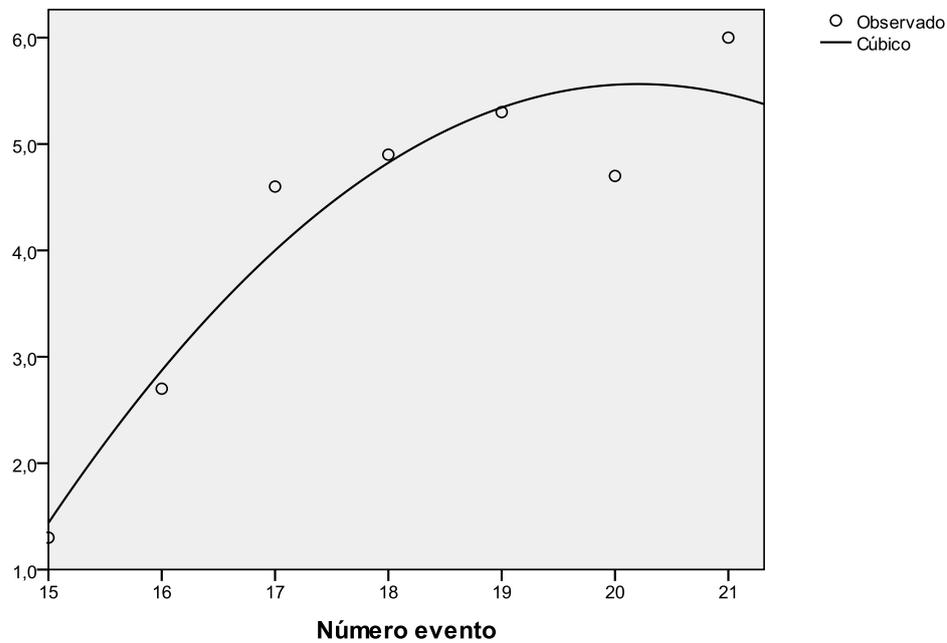
	Coeficientes no estandarizados		Coeficientes estandarizados		
	B	Error típico	Beta	t	Sig.
Número evento	6,157	2,356	8,143	2,614	,059
Número evento ** 2	-,152	,065	-7,263	-2,332	,080
(Constante)	-56,633	21,014		-2,695	,054

**Términos excluidos**

	Beta dentro	t	Sig.	Correlación parcial	Tolerancia mínima
Número evento ** 3 <sup>a</sup>	72,258	1,613	,205	,682	,000

a. Se ha alcanzado el límite de tolerancia para la introducción de variables.

**Altura de carga**



## Análisis de residuos

### Resumen del procesamiento de los casos

	Casos					
	Válidos		Perdidos		Total	
	N	Porcentaje	N	Porcentaje	N	Porcentaje
Error modelo cúbico	7	100,0%	0	,0%	7	100,0%

### Descriptivos

		Estadístico	Error típ.
Error modelo cúbico	Media	,0000000	,18485761
	Intervalo de confianza para la Límite inferior media al 95%	-,4523303	
	Límite superior	,4523303	
	Media recortada al 5%	,0142857	
	Mediana	-,0428571	
	Varianza	,239	
	Desv. típ.	,48908726	
	Mínimo	-,85714	
	Máximo	,60000	
	Rango	1,45714	
	Amplitud intercuartil	,70476	
	Asimetría	-,537	,794
	Curtosis	,729	1,587

### Pruebas de normalidad

	Kolmogorov-Smirnov <sup>a</sup>			Shapiro-Wilk		
	Estadístico	gl	Sig.	Estadístico	gl	Sig.
Error modelo cúbico	,220	7	,200*	,924	7	,503

a. Corrección de la significación de Lilliefors

\*. Este es un límite inferior de la significación verdadera.

**Prueba de rachas**

	Error modelo cúbico
Valor de prueba <sup>a</sup>	-,04286
Casos < Valor de prueba	3
Casos >= Valor de prueba	4
Casos en total	7
Número de rachas	4
Z	,000
Sig. asintót. (bilateral)	1,000

a. Mediana

**Análisis modelo cuadrático**

**Resumen del modelo**

R	R cuadrado	R cuadrado corregida	Error típico de la estimación
,954	,910	,866	,599

La variable independiente es Número evento.

**ANOVA**

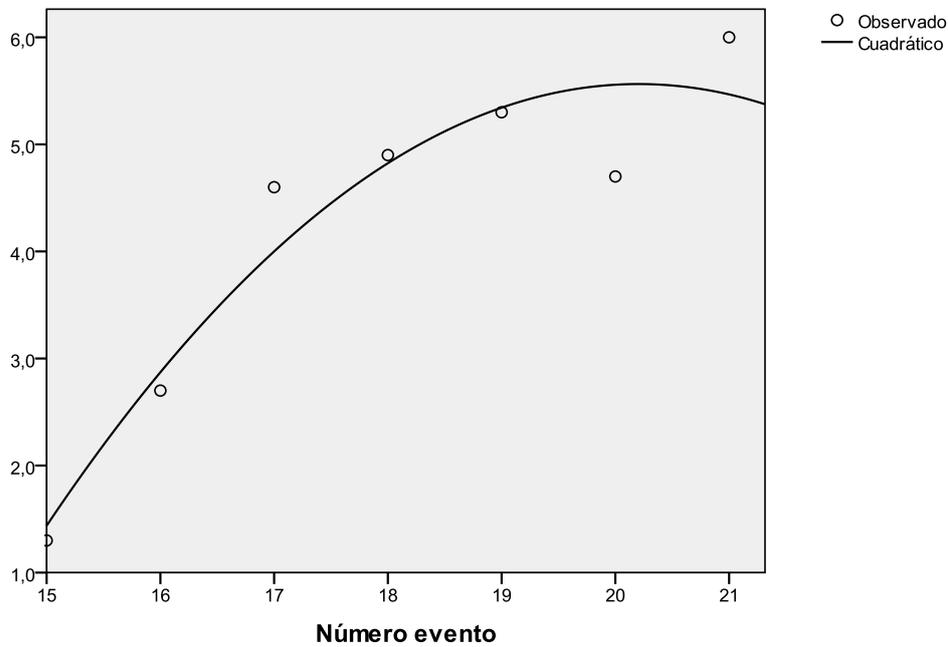
	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Regresión	14,573	2	7,287	20,308	,008
Residual	1,435	4	,359		
Total	16,009	6			

La variable independiente es Número evento.

**Coefficientes**

	Coefficients no estandarizados		Coefficients estandarizados		
	B	Error típico	Beta	t	Sig.
Número evento	6,157	2,356	8,143	2,614	,059
Número evento ** 2	-,152	,065	-7,263	-2,332	,080
(Constante)	-56,633	21,014		-2,695	,054

**Altura de carga**



**Análisis residuos**

**Resumen del procesamiento de los casos**

	Casos					
	Válidos		Perdidos		Total	
	N	Porcentaje	N	Porcentaje	N	Porcentaje
Error modelo cuadrático	7	100,0%	0	,0%	7	100,0%

**Descriptivos**

		Estadístico	
Error modelo cuadrático	Media	,0000000	
	Intervalo de confianza para la media al 95%	Límite inferior	-,4523303
		Límite superior	,4523303
	Media recortada al 5%	,0142857	
	Mediana	-,0428571	
	Varianza	,239	
	Desv. típ.	,48908726	
	Mínimo	-,85714	
	Máximo	,60000	
	Rango	1,45714	
	Amplitud intercuartil	,70476	
	Asimetría	-,537	
	Curtosis	,729	

**Descriptivos**

		Error típ.
Error modelo cuadrático	Media	,18485761
	Asimetría	,794
	Curtosis	1,587

**Pruebas de normalidad**

	Kolmogorov-Smirnov <sup>a</sup>			Shapiro-Wilk		
	Estadístico	gl	Sig.	Estadístico	gl	Sig.
Error modelo cuadrático	,220	7	,200*	,924	7	,503

a. Corrección de la significación de Lilliefors

\*. Este es un límite inferior de la significación verdadera.

**Prueba de rachas**

	Error modelo cuadrático
Valor de prueba <sup>a</sup>	-,04286
Casos < Valor de prueba	3
Casos >= Valor de prueba	4
Casos en total	7
Número de rachas	4
Z	,000
Sig. asintót. (bilateral)	1,000

a. Mediana

**ANEXO VII**  
**RESULTADOS DE ANÁLISIS**  
**ESTADÍSTICO CON SPSS DE ENSAYO 4**



## Análisis de normalidad para MPN

Resumen del procesamiento de los casos

	Casos					
	Válidos		Perdidos		Total	
	N	Porcentaje	N	Porcentaje	N	Porcentaje
MPN	6	100,0%	0	,0%	6	100,0%

Pruebas de normalidad

	Kolmogorov-Smirnov <sup>a</sup>			Shapiro-Wilk		
	Estadístico	gl	Sig.	Estadístico	gl	Sig.
MPN	,490	6	,000	,498	6	,000

a. Corrección de la significación de Lilliefors

## Análisis de normalidad para Ln(MPN)

Resumen del procesamiento de los casos

	Casos					
	Válidos		Perdidos		Total	
	N	Porcentaje	N	Porcentaje	N	Porcentaje
Ln(MPN)	6	100,0%	0	,0%	6	100,0%

Pruebas de normalidad

	Kolmogorov-Smirnov <sup>a</sup>			Shapiro-Wilk		
	Estadístico	gl	Sig.	Estadístico	gl	Sig.
Ln(MPN)	,216	6	,200*	,858	6	,184

a. Corrección de la significación de Lilliefors

\*. Este es un límite inferior de la significación verdadera.

## Análisis de regresión para Ln(MPN)

### Variabes introducidas/eliminadas<sup>b</sup>

Modelo	Variabes introducidas	Variabes eliminadas	Método
1	Semana <sup>a</sup>	.	Introducir

a. Todas las variables solicitadas introducidas.

b. Variable dependiente: Ln(MPN)

### Resumen del modelo<sup>b</sup>

Modelo	R	R cuadrado	R cuadrado corregida	Error típ. de la estimación	Durbin-Watson
1	,907 <sup>a</sup>	,824	,779	6,70198	2,562

a. Variables predictoras: (Constante), Semana

b. Variable dependiente: Ln(MPN)

### ANOVA<sup>b</sup>

Modelo		Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
1	Regresión	838,516	1	838,516	18,668	,012 <sup>a</sup>
	Residual	179,666	4	44,916		
	Total	1018,182	5			

a. Variables predictoras: (Constante), Semana

b. Variable dependiente: Ln(MPN)

### Estadísticos sobre los residuos<sup>a</sup>

	Mínimo	Máximo	Media	Desviación típica	N
Valor pronosticado	22,7191	57,3295	40,0243	12,95003	6
Residual	-11,11662	4,53382	,00000	5,99443	6
Valor pronosticado típ.	-1,336	1,336	,000	1,000	6
Residuo típ.	-1,659	,676	,000	,894	6

a. Variable dependiente: Ln(MPN)

## Análisis de los residuos

**Resumen del procesamiento de los casos**

	Casos					
	Válidos		Perdidos		Total	
	N	Porcentaje	N	Porcentaje	N	Porcentaje
Standardized Residual	6	100,0%	0	,0%	6	100,0%

**Pruebas de normalidad**

	Kolmogorov-Smirnov <sup>a</sup>			Shapiro-Wilk		
	Estadístico	gl	Sig.	Estadístico	gl	Sig.
Standardized Residual	,277	6	,168	,804	6	,064

a. Corrección de la significación de Lilliefors

**Prueba de rachas**

	Standardized Residual
Valor de prueba <sup>a</sup>	,36372
Casos < Valor de prueba	3
Casos >= Valor de prueba	3
Casos en total	6
Número de rachas	3
Z	-,456
Sig. asintót. (bilateral)	,648

a. Mediana



**ANEXO VIII**  
**RESULTADOS DE ANÁLISIS**  
**COMPARATIVO CON SPSS DE ENSAYOS 2 Y 3**



## Prueba T entre Ensayos 2 y 3

**Estadísticos de grupo**

	Etapa	N	Media	Desviación típ.	Error típ. de la media
E <sub>fS</sub> I	I	4	92,9500	3,06866	1,53433
	III	4	97,7250	,97767	,48883
E <sub>fA</sub> I	I	4	96,6250	2,17466	1,08733
	III	4	96,6250	2,83945	1,41973

**Prueba de muestras independientes**

		Prueba de Levene para la igualdad de varianzas		Prueba T para la igualdad de medias
		F	Sig.	t
E <sub>fS</sub> I	Se han asumido varianzas iguales	3,790	,100	-2,965
	No se han asumido varianzas iguales			-2,965
E <sub>fA</sub> I	Se han asumido varianzas iguales	,058	,818	,000
	No se han asumido varianzas iguales			,000

**Prueba de muestras independientes**

		Prueba T para la igualdad de medias		
		gl	Sig. (bilateral)	Diferencia de medias
E <sub>f<sub>s</sub></sub> I	Se han asumido varianzas iguales	6	,025	-4,77500
	No se han asumido varianzas iguales	3,603	,047	-4,77500
E <sub>f<sub>A</sub></sub> I	Se han asumido varianzas iguales	6	1,000	,00000
	No se han asumido varianzas iguales	5,618	1,000	,00000

**Prueba de muestras independientes**

		Prueba T para la igualdad de medias		
		95% Intervalo de confianza para la diferencia		
		Error típ. de la diferencia	Inferior	Superior
E <sub>f<sub>s</sub></sub> I	Se han asumido varianzas iguales	1,61032	-8,71531	-,83469
	No se han asumido varianzas iguales	1,61032	-9,44722	-,10278
E <sub>f<sub>A</sub></sub> I	Se han asumido varianzas iguales	1,78827	-4,37574	4,37574
	No se han asumido varianzas iguales	1,78827	-4,44879	4,44879

## Estimación curvilínea de eficiencia de depuración de aceites para Ensayos 2 y 3.

### Descripción del modelo

	Nombre del modelo	MOD_6
Variable dependiente	1	Número de evento
Ecuación	1	Lineal
	2	Logarítmica
	3	Inversa
	4	Cuadrático
	5	Cúbico
	6	Compuesto <sup>a</sup>
	7	Potencia <sup>a</sup>
	8	S <sup>a</sup>
	9	Crecimiento <sup>a</sup>
	10	Exponencial <sup>a</sup>
	Variable independiente	Ef <sub>A</sub> I
	Constante	Incluidos
	Variable cuyos valores etiquetan las observaciones en los gráficos	Etapas
	Tolerancia para la entrada de términos en ecuaciones	,0001

a. El modelo necesita todos los valores no perdidos para ser positivo.

### Resumen del procesamiento de los

#### casos

	N
Total de casos	28
Casos excluidos <sup>a</sup>	20
Casos pronosticados	0
Casos creados nuevos	0

**Resumen del procesamiento de los casos**

	N
Total de casos	28
Casos excluidos <sup>a</sup>	20
Casos pronosticados	0
Casos creados nuevos	0

a. Los casos con un valor perdido en cualquier variable se excluyen del análisis.

**Resumen del procesamiento de las variables**

	Variables	
	Dependiente	Independiente
	Número de evento	Ef <sub>A</sub> I
Número de valores positivos	28	8
Número de ceros	0	0
Número de valores negativos	0	0
Número de valores perdidos	0	0
Perdidos definidos por el usuario	0	0
Perdidos del sistema	0	20

**Resumen del modelo y estimaciones de los parámetros**

Variable dependiente: Número de evento

Ecuación	Resumen del modelo					Estimaciones de los parámetros
	R cuadrado	F	gl1	gl2	Sig.	Constante
Lineal	,014	,085	1	6	,781	
Logarítmica	,015	,093	1	6	,770	
Inversa	,017	,103	1	6	,759	
Cuadrático	,014	,085	1	6	,781	

(Continúa en página siguiente)

**Resumen del modelo y estimaciones de los parámetros (continuación)**

Variable dependiente: Número de evento

Ecuación	Resumen del modelo					Estimaciones de los parámetros
	R cuadrado	F	gl1	gl2	Sig.	Constante
Cúbico	,510	2,604	2	5	,168	
Compuesto	,046	,291	1	6	,609	,000
Potencia	,049	,308	1	6	,599	4,928E-20
S	,051	,325	1	6	,589	12,053
Crecimiento	,046	,291	1	6	,609	-8,170
Exponencial	,046	,291	1	6	,609	,000

La variable independiente es  $E_{fA}$  I.

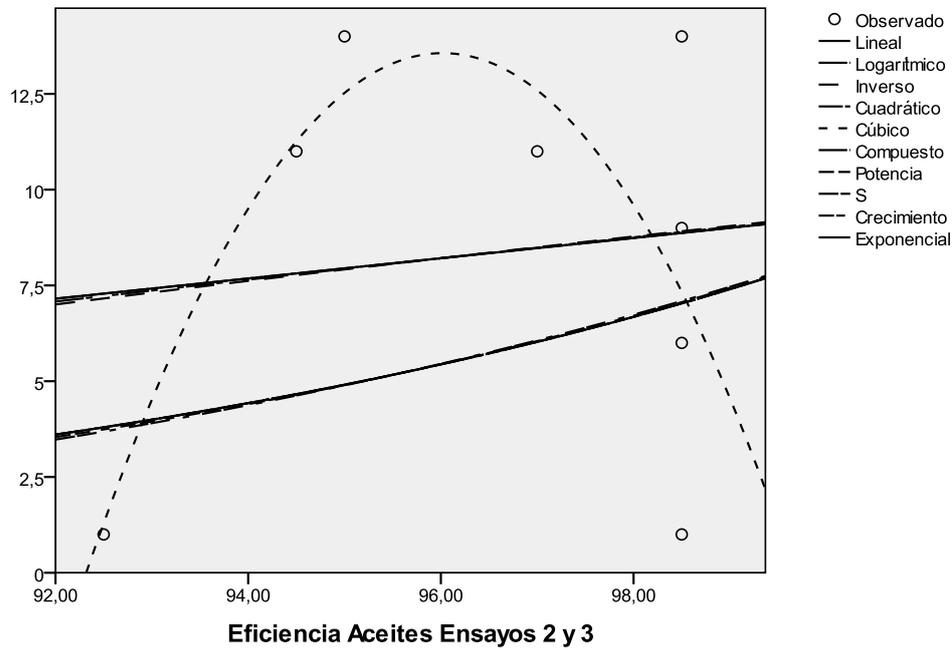
**Resumen del modelo y estimaciones de los parámetros**

Variable dependiente: Número de evento

Ecuación	Estimaciones de los parámetros			
	Constante	b1	b2	b3
Lineal	-17,119	,264		
Logarítmica	-112,942	26,543		
Inversa	35,963	-2664,329		
Cuadrático	-17,119	,264	,000	
Cúbico	-6153,945	96,348	,000	-,003
Compuesto		1,108		
Potencia		10,111		
S		-994,224		
Crecimiento		,103		
Exponencial		,103		

La variable independiente es  $E_{fA}$  I.

### Número de evento



### Análisis de normalidad de valores de desnivel de Ensayos 2 y 3

#### Resumen del procesamiento de los casos

	Casos					
	Válidos		Perdidos		Total	
	N	Porcentaje	N	Porcentaje	N	Porcentaje
Desnivel	23	82,1%	5	17,9%	28	100,0%

#### Pruebas de normalidad

	Kolmogorov-Smirnov <sup>a</sup>			Shapiro-Wilk		
	Estadístico	gl	Sig.	Estadístico	gl	Sig.
Desnivel	,188	23	,034	,899	23	,024

a. Corrección de la significación de Lilliefors

## Análisis de normalidad de valores de desnivel de Ensayos 2 y 3 transformados

**Resumen del procesamiento de los casos**

	Casos					
	Válidos		Perdidos		Total	
	N	Porcentaje	N	Porcentaje	N	Porcentaje
Cúbica	23	82,1%	5	17,9%	28	100,0%

**Pruebas de normalidad**

	Kolmogorov-Smirnov <sup>a</sup>			Shapiro-Wilk		
	Estadístico	gl	Sig.	Estadístico	gl	Sig.
Cúbica	,151	23	,192	,927	23	,093

a. Corrección de la significación de Lilliefors

## Prueba T

**Estadísticos de grupo**

Etapa	N	Media	Desviación típ.	Error típ. de la media
Cúbica EIV	9	1,5868	,27807	,09269
EVI	14	1,7270	,27909	,07459

**Prueba de muestras independientes**

		Prueba de Levene para la igualdad de varianzas		Prueba T para la igualdad de medias	
		F	Sig.	t	gl
Cúbica	Se han asumido varianzas iguales	,001	,972	-1,178	21
	No se han asumido varianzas iguales			-1,179	17,261

**Prueba de muestras independientes**

		Prueba T para la igualdad de medias		
		Sig. (bilateral)	Diferencia de medias	Error típ. de la diferencia
Cúbica	Se han asumido varianzas iguales	,252	-,14024	,11907
	No se han asumido varianzas iguales	,254	-,14024	,11898

**Prueba de muestras independientes**

		Prueba T para la igualdad de medias	
		95% Intervalo de confianza para la diferencia	
		Inferior	Superior
Cúbica	Se han asumido varianzas iguales	-,38787	,10739
	No se han asumido varianzas iguales	-,39097	,11049

**Estimación curvilínea**

**Descripción del modelo**

Variable dependiente	Nombre del modelo	
	1	MOD_3
Ecuación	1	Desnivel
	2	Lineal
	3	Logarítmica
	4	Inversa
	5	Cuadrático
	6	Cúbico
	7	Compuesto <sup>a</sup>
		Potencia <sup>a</sup>

(Continúa en página siguiente)

**Descripción del modelo** (continuación)

8	S <sup>a</sup>	
9	Crecimiento <sup>a</sup>	
10	Exponencial <sup>a</sup>	
Variable independiente	Número de evento	
Constante	Incluidos	
Variable cuyos valores etiquetan las observaciones en los gráficos	Etapa	
Tolerancia para la entrada de términos en ecuaciones		,0001

a. El modelo necesita todos los valores no perdidos para ser positivo.

**Resumen del procesamiento de los  
casos**

	N
Total de casos	28
Casos excluidos <sup>a</sup>	5
Casos pronosticados	0
Casos creados nuevos	0

a. Los casos con un valor perdido en cualquier variable se excluyen del análisis.

**Resumen del procesamiento de las variables**

	Variables	
	Dependiente	Independiente
	Desnivel	Número de evento
Número de valores positivos	23	28
Número de ceros	0	0
Número de valores negativos	0	0
Número de valores perdidos		
Perdidos definidos por el usuario	0	0
Perdidos del sistema	5	0

**Resumen del modelo y estimaciones de los parámetros**

Variable dependiente: Desnivel

Ecuación	Resumen del modelo					Estimaciones de los parámetros
	R cuadrado	F	gl1	gl2	Sig.	Constante
Lineal	,836	106,890	1	21	,000	
Logarítmica	,630	35,715	1	21	,000	
Inversa	,290	8,578	1	21	,008	
Cuadrático	,860	61,295	2	20	,000	
Cúbico	,893	52,854	3	19	,000	
Compuesto	,830	102,245	1	21	,000	1,778
Potencia	,654	39,683	1	21	,000	1,428
S	,308	9,327	1	21	,006	1,788
Crecimiento	,830	102,245	1	21	,000	,575
Exponencial	,830	102,245	1	21	,000	1,778

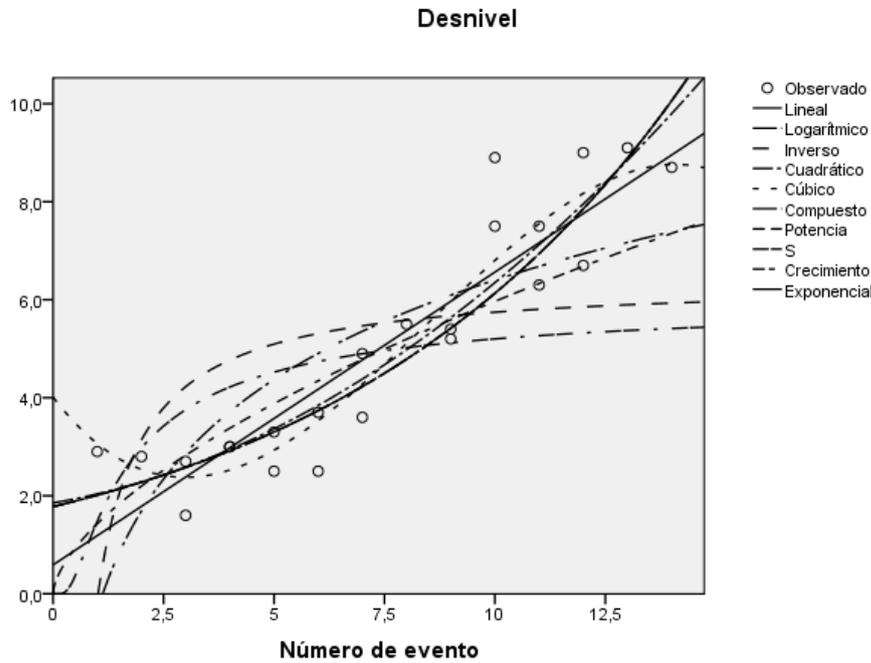
La variable independiente es Número de evento.

**Resumen del modelo y estimaciones de los parámetros**

Variable dependiente: Desnivel

Ecuación	Estimaciones de los parámetros			
	Constante	b1	b2	b3
Lineal	,588	,598		
Logarítmica	-,346	2,930		
Inversa	6,397	-6,520		
Cuadrático	1,854	,155	,029	
Cúbico	4,012	-1,179	,239	-,009
Compuesto		1,132		
Potencia		,621		
S		-1,396		
Crecimiento		,124		
Exponencial		,124		

La variable independiente es Número de evento.



### Análisis de modelo cúbico

Resumen del modelo

R	R cuadrado	R cuadrado corregida	Error típico de la estimación
,945	,893	,876	,863

La variable independiente es Número de evento.

ANOVA

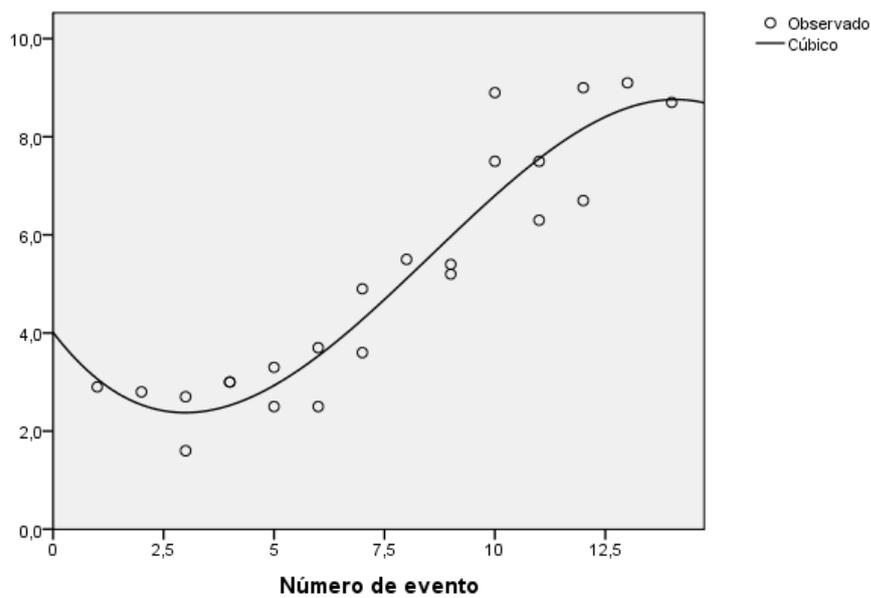
	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Regresión	118,158	3	39,386	52,854	,000
Residual	14,158	19	,745		
Total	132,317	22			

La variable independiente es Número de evento.

**Coefficientes**

	Coefficientes no estandarizados		Coefficientes estandarizados		
	B	Error típico	Beta	t	Sig.
Número de evento	-1,179	,591	-1,804	-1,993	,061
Número de evento ** 2	,239	,087	5,637	2,734	,013
Número de evento ** 3	-,009	,004	-2,994	-2,430	,025
(Constante)	4,012	1,154		3,475	,003

**Desnivel**



## **ANEXO IX FOTOGRAFÍAS DEL SCPT**





Foto IX.1. Imagen general del SCPT y sus elementos complementarios.

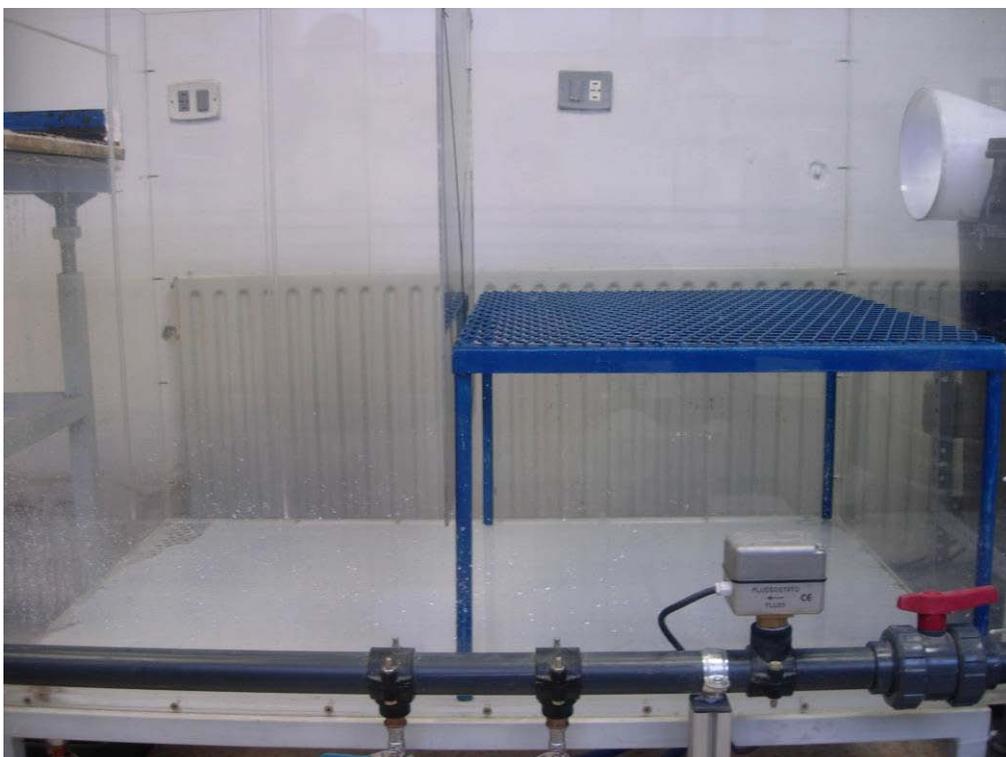


Foto IX.2. SCPT con pantalla y soporte de sistema de filtrado.



Foto IX.3. Detalle de soporte de sistema de filtrado.



Foto IX.4. Detalle de vista del SCPT desde la rampa de aducción.



Foto IX. 5. SCPT antes del inicio de un evento del Ensayo 2.



Foto IX.6. SCPT en funcionamiento durante un evento del Ensayo 2.



Foto IX.7. Vista del SCPT luego de un evento y posterior vaciado del Ensayo 2.



Foto IX.8. Otra vista del SCPT luego de un evento y vaciado en el Ensayo 2

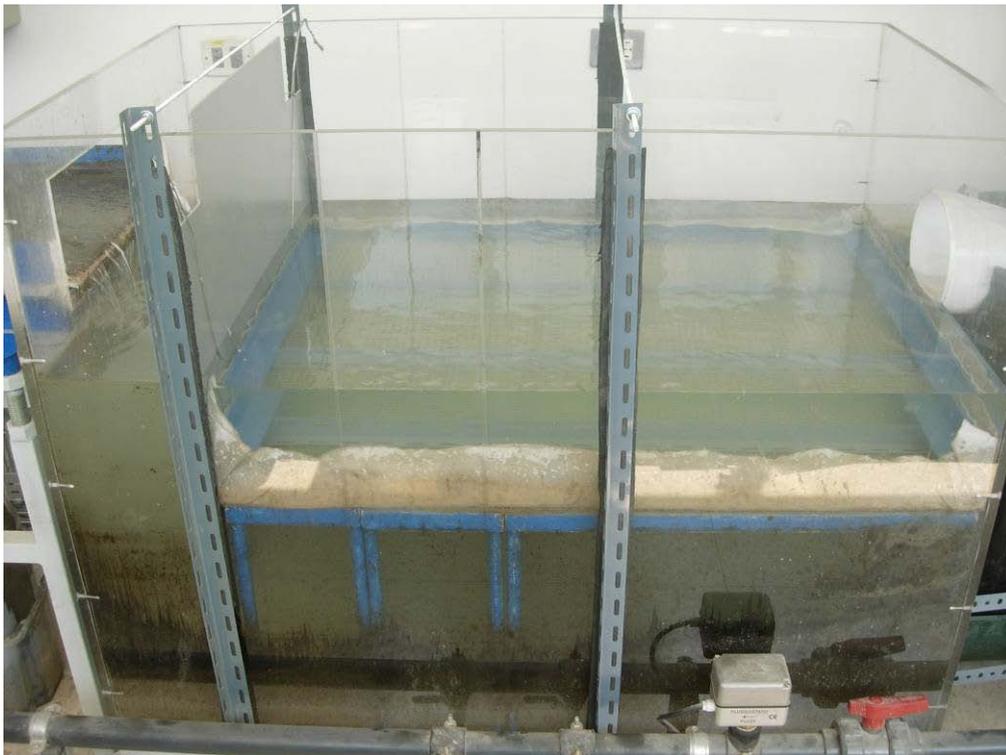


Foto IX.9. SCPT en funcionamiento durante un evento del Ensayo 3.



Foto IX.10. Vista superior del SCPT durante un evento del Ensayo 3.

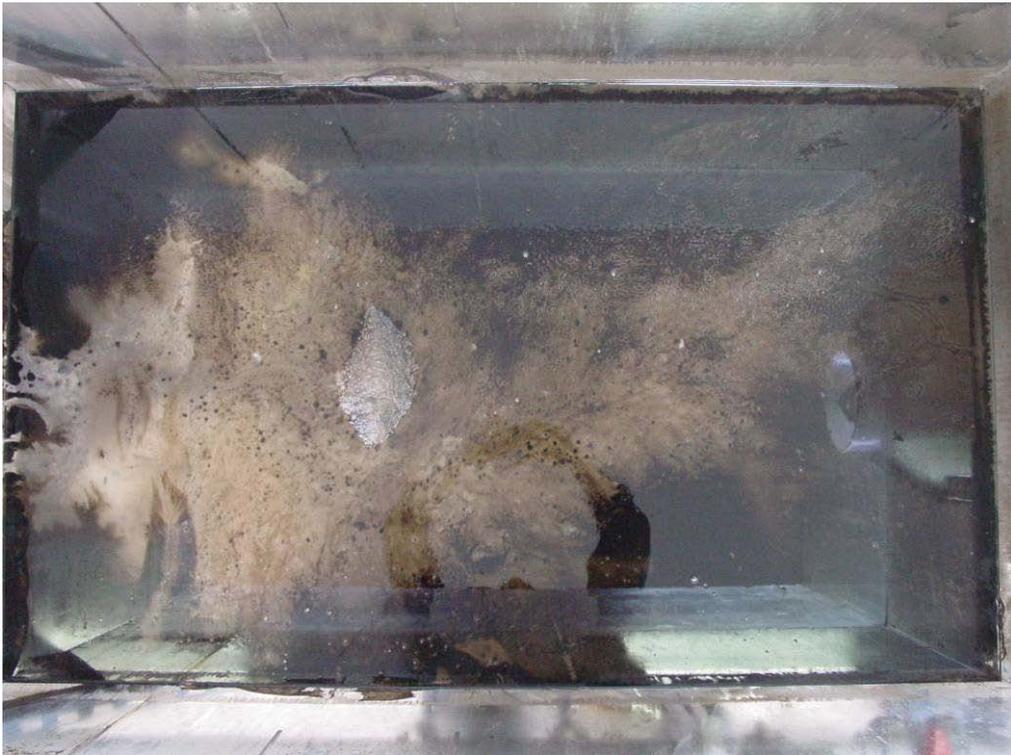


Foto IX.11. Vista superior luego de finalizada la etapa E1 del Ensayo 3.



Foto IX.12. Imagen del geotextil luego de finalizada la etapa E1 del Ensayo 3.



Foto IX.13. Imagen modificación del SCPT para el Ensayo 4.



Foto IX.14. Otra vista del SCPT con la modificación para el Ensayo 4.