



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Química

**MEDIDA Y ANÁLISIS DE LA CONCENTRACIÓN EN EL AIRE DE 6
COMPUESTOS (BENCENO, TOLUENO, ESTIRENO, CUMENO, O-XILENO Y
ÁCIDO SULFHÍDRICO) EN LA ESTACIÓN DEPURADORA DE AGUAS
RESIDUALES DEL AYUNTAMIENTO DE PADUL, PROVINCIA DE GRANADA**

Edgar David Cano Sánchez

Asesorado por el Dr. Diego Pablo Ruiz Padillo

Guatemala, noviembre de 2011

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**MEDIDA Y ANÁLISIS DE LA CONCENTRACIÓN EN EL AIRE DE 6
COMPUESTOS (BENCENO, TOLUENO, ESTIRENO, CUMENO, O-XILENO Y
ÁCIDO SULFÚRICO) EN LA ESTACIÓN DEPURADORA DE AGUAS
RESIDUALES DEL AYUNTAMIENTO DE PADUL, PROVINCIA DE GRANADA**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

EDGAR DAVID CANO SÁNCHEZ
ASESORADO POR EL DR. DIEGO PABLO RUIZ PADILLO

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO AMBIENTAL

GUATEMALA, NOVIEMBRE DE 2011

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



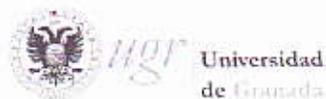
NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
VOCAL I	Ing. Alfredo Enrique Beber Aceituno
VOCAL II	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL III	Ing. Miguel Ángel Dávila Calderón
VOCAL IV	Br. Juan Carlos Molina Jiménez
VOCAL V	Br. Mario Maldonado Muralles
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
EXAMINADOR	Ing. Jorge Mario Estrada Asturias
EXAMINADORA	Inga. Casta Petrona Zeceña Zeceña
EXAMINADOR	Ing. Juan Carlos Fuentes Montepeque
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

PROYECTO DE FIN DE CARRERA
LICENCIATURA EN CIENCIAS
AMBIENTALES
FACULTAD DE CIENCIAS
UNIVERSIDAD DE GRANADA



**MEDIDA Y ANÁLISIS DE LA CONCENTRACIÓN EN EL AIRE DE 6
COMPUESTOS (BENCENO, TOLUENO, ESTIRENO, CUMENO, O-XILENO Y
ÁCIDO SULFÚDRICO) EN LA ESTACIÓN DEPURADORA DE AGUAS
RESIDUALES DEL AYUNTAMIENTO DE PADUL, PROVINCIA DE GRANADA**

Edgar David Cano Sánchez
Licenciatura en Ingeniería Ambiental
Universidad de San Carlos de Guatemala
Granada, 2011

Tutor: Diego Pablo Ruiz Padillo, Dpto. Física Aplicada, Facultad de Ciencias,
Universidad de Granada

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

**MEDIDA Y ANÁLISIS DE LA CONCENTRACIÓN EN EL AIRE DE 6
COMPUESTOS (BENCENO, TOLUENO, ESTIRENO, CUMENO, O-XILENO Y
ÁCIDO SULFHÍDRICO) EN LA ESTACIÓN DEPURADORA DE AGUAS
RESIDUALES DEL AYUNTAMIENTO DE PADUL, PROVINCIA DE GRANADA**

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Química, con fecha marzo 2011.


Edgar David Cano Sánchez



Universidad
de Granada

Granada, 2 de Septiembre de 2011.

A quien pueda interesar:

D. Diego Pablo Ruiz Padillo, Coordinador del Programa PIMA de la Universidad de Granada hace constar que:

D Edgar David Cano Sánchez, ha desarrollado su estancia PIMA con aprovechamiento y ha cursado las asignaturas Contaminación Atmosférica y Proyecto Ambiental, con las calificaciones que constan en su expediente oficial.

Durante su estancia en la Universidad de Granada, el alumno ha realizado el Proyecto Ambiental superándolo con la calificación de Sobresaliente, según el reglamento de Proyectos de la Licenciatura de Ciencias Ambientales de la Universidad de Granada. Según este reglamento los alumnos realizan un trabajo tutorizado por un profesor que es evaluado por la Comisión académica de la Licenciatura de Ciencias Ambientales, siendo un requisito necesario la superación de este proyecto para la obtención del título oficial.

Y para que así conste lo firmo en Granada a 2 de Septiembre de 2011.

Reciban un cordial saludo,

Fdo. Dr. Diego Pablo Ruiz Padillo
Coordinador Red PIMA Medio Ambiente.
Universidad de Granada
Tfno.: +34 958 244161
Correo electrónico: druiz@ugr.es



El Director de la Escuela de Ingeniería Química de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen del Asesor de la Universidad de Granada, España, **Dr. Diego Pablo Ruiz Padillo**; del trabajo de graduación del estudiante, **EDGAR DAVID CANO SÁNCHEZ**, identificado con carné No. **2002-12506** titulado "**MEDIDA Y ANÁLISIS DE LA CONCENTRACIÓN EN EL AIRE DE 6 COMPUESTOS (BENCENO, TOLUENO, ESTIRENO, CUMENO, O-XILENO Y ÁCIDO SULFÚRICO) EN LA ESTACIÓN DEPURADORA DE AGUAS RESIDUALES DEL AYUNTAMIENTO DE PADUL, PROVINCIA DE GRANADA**". Procede a la autorización del mismo, ya que reúne rigor, coherencia y calidad requeridos. Es importante referir que el trabajo de graduación se realizó en el marco del programa de intercambio académico y movilidad estudiantil de la Facultad de Ingeniería.


Ing. Williams Guillermo Álvarez Mejía; C.Dr.
DIRECTOR
Escuela de Ingeniería Química

Guatemala, noviembre de 2011

Cc: Archivo
WGAM/ale





DTG. 528.2011.

El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Química, al trabajo de graduación titulado: **MEDIDA Y ANÁLISIS DE LA CONCENTRACIÓN EN EL AIRE DE 6 COMPUESTOS (BENCENO, TOLUENO, ESTIRENO, CUMENO, O-XILENO Y ÁCIDO SULFHÍDRICO) EN LA ESTACIÓN DEPURADORA DE AGUAS RESIDUALES DEL AYUNTAMIENTO DE PADUL, PROVINCIA DE GRANADA, ESPAÑA**, presentado por el estudiante universitario **Edgar David Cano Sánchez**, como parte de la política de Internacionalización y el Programa de Intercambio de Movilidad Académica de la Facultad de Ingeniería, por tanto autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:



Ing. Murphy Olimpo Paiz Recinos
Decano



Guatemala, 25 de noviembre de 2011.

/gdech

AGRADECIMIENTOS A:

Programa de Intercambio y Movilidad de Alumnos (PIMA)	Por permitirme participar en este intercambio dentro del marco de temas relacionados con el medio ambiente.
Organización de Estados Iberoamericanos y la Junta de Andalucía	Por proporcionarme los medios para realizar el intercambio y poder terminar con éxito esta experiencia.
Universidad de Granada	Por aceptarme como alumno de la carrera de Licenciatura en Ciencias Ambientales y brindarme todo el apoyo necesario para la realización de este trabajo.
Diego Pablo Ruiz Padillo	Por su tiempo, apoyo y aporte científico en la realización del proyecto.
Deisi Altmajer Vaz	Por su apoyo y entusiasmo en transmitir sus conocimientos.
Marian Martin Lara	Por su dedicación dentro del aula y la paciencia para enseñar.

Universidad de San Carlos de Guatemala Mi alma máter, por haberme brindado los conocimientos y valores para poder enfrentar este reto de la mejor manera, además de los medios para poder llegar a España.

Edgar, Elisa, Adriana y Scarlette y a toda mi familia Por el amor, paciencia y apoyo incondicional a lo largo de mi vida.

Amigos y amigas de Guatemala Por su amistad y compañía siempre en los buenos y malos momentos.

Amigos y amigas de Granada Por hacerme sentir en casa y por su amistad esta experiencia fue aun mejor.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	V
OBJETIVOS	IX
INTRODUCCIÓN	XI
1. MARCO TEÓRICO	1
1.1. Las estaciones depuradoras de aguas residuales	1
1.1.1. Línea de agua.....	8
1.1.1.1. Pretratamiento.....	9
1.1.1.2. Tratamiento primario.....	13
1.1.1.3. Tratamiento secundario.....	16
1.1.1.4. Tratamiento terciario.....	19
1.1.2. Línea de fangos.....	20
1.1.2.1. Pretratamiento.....	20
1.1.2.2. Espesado.....	21
1.1.2.3. Estabilización.....	22
1.1.2.4. Deshidratación.....	22
1.2. La estación depuradora de aguas residuales de Padul.....	23
1.3. Compuestos orgánicos volátiles.....	36
1.3.1. Definición.....	37
1.3.2. Benceno.....	41
1.3.2.1. Aplicaciones	42
1.3.2.2. Toxicidad.....	42
1.3.3. Tolueno	43
1.3.3.1. Aplicaciones	44
1.3.3.2. Toxicidad.....	45

1.3.4.	Cumeno.....	46
1.3.4.1.	Aplicaciones.....	46
1.3.4.2.	Toxicidad.....	46
1.3.5.	Estireno.....	47
1.3.5.1.	Aplicaciones.....	48
1.3.5.2.	Toxicidad.....	48
1.3.6.	O-xileno.....	49
1.3.6.1.	Aplicaciones.....	50
1.3.6.2.	Toxicidad.....	51
1.3.7.	Ácido sulfhídrico.....	52
1.3.7.1.	Aplicaciones.....	53
1.3.7.2.	Toxicidad.....	53
1.4.	Niveles máximos de exposición laboral.....	54
1.4.1.	Límites <i>STEL</i> y <i>TWA</i> de la Comisión Europea.....	54
1.4.2.	Límites <i>VLA-ED</i> y <i>VLA-EC</i> del Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo.....	56
1.4.3.	Límites para los gases medidos en la EDAR de Padul.....	57
1.5.	Detector de fotoionización.....	58
2.	METODOLOGÍA.....	65
3.	RESULTADOS.....	71
3.1.	Resultados del contraste de hipótesis de medias.....	90
4.	DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	93
	CONCLUSIONES.....	99
	RECOMENDACIONES.....	101

BIBLIOGRAFÍA	103
APÉNDICE	105

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1. Diagrama de bloques de la EDAR de Padul.....	25
2. Esquema general de la EDAR de Padul.....	27
3. Distribución espacial del edificio y puntos de muestreo escogidos.....	28
4. Pozo de gruesos y aliviadero.....	29
5. Cuchara bivalva del pozo de gruesos.....	29
6. Tamiz de gruesos.....	29
7. Tamiz de finos.....	30
8. Pozo de bombeo.....	30
9. Desarenador y desgrasador.....	30
10. Aforador Parshall.....	31
11. Canal de homogenización.....	31
12. Reactor biológico.....	31
13. Reactor biológico sección aerobia.....	32
14. Reactor biológico sección anaerobia.....	32
15. Sedimentador secundario.....	32
16. Vertedero del decantador secundario.....	33
17. Rasqueta del sedimentador secundario.....	33
18. Salida de la planta del agua tratada.....	33
19. Espesador de lodos por gravedad.....	34
20. Centrífuga de deshidratación.....	34
21. Máquina de polímero.....	34
22. Desagüe de la centrífuga.....	35

23. Ubicación de la centrífuga.....	35
24. Salida de lodo estabilizado.....	35
25. Localización del contenedor de recolección.....	36
26. Puntos de toma de muestra general.....	65
27. Puntos de toma de muestra en el edificio.....	66
28. Comparación de concentración promedio de ácido sulfhídrico con límites STEL y TWA.....	73
29. Comparación de concentración promedio de benceno con límites STEL y TWA.....	74
30. Comparación de concentración promedio de cumeno con límites STEL y TWA.....	75
31. Comparación de concentración promedio de tolueno con límites STEL y TWA.....	76
32. Comparación de concentración promedio de estireno con límites STEL y TWA.....	77
33. Comparación de concentración promedio de o-xileno con límites STEL y TWA.....	78
34. Comparación de concentración promedio de ácido sulfhídrico con límites VLA-EC y VLA-ED.....	79
35. Comparación de concentración promedio de benceno con límites VLA-EC y VLA-ED.....	80
36. Comparación de concentración promedio de cumeno con límites VLA-EC y VLA-ED.....	81
37. Comparación de concentración promedio de tolueno con límites VLA-EC y VLA-ED.....	82
38. Comparación de concentración promedio de estireno con límites VLA-EC y VLA-ED.....	83
39. Comparación de concentración promedio de o-xileno con límites VLA-EC y VLA-ED.....	84

40. Zonificación general de niveles de concentración de COVs en la EDAR de Padul.....	85
41. Zonificación dentro del edificio de los niveles de concentración de COVs.....	86
42. Oscilación de concentraciones de ácido sulfhídrico en el cuarto de deshidratación en periodos de 10 minutos.....	87
43. Concentraciones de ácido sulfhídrico en el tiempo.....	88
44. Oscilación de concentraciones de benceno en el cuarto de deshidratación en periodos de 10 minutos.....	89
45. Concentración de benceno en el tiempo.....	90

TABLAS

I. Fuentes y mecanismos de liberación de COV del agua residual a la atmósfera	3
II. Lista de concentraciones de compuestos tóxicos para el aire de una EDAR indicados por AMSA (<i>Association of metropolitan sewerage agencies</i>).....	7
III. Información típica para el proyecto de rejillas de barras de limpieza manual y mecánica.....	10
IV. Caudales de operación de la EDAR de Padul.....	24
V. Clasificación de contaminantes orgánicos (OMS 1989)	39
VI. Clasificación de COVs (EPA).....	39
VII. Límites de exposición profesional C.E. e INSHT	58
VIII. Características físicas y químicas de los gases medidos en la EDAR de Padul.....	59
IX. Especificaciones del detector MiniRAE 3000.....	62
X. Energía de ionización y factores de corrección para cada lámpara.....	64

XI. Concentraciones promedio en ppm en los puntos de muestreo.....	72
XII. Medias diarias de concentración en el aire en el cuarto de deshidratación de fangos.....	90
XIII. Aceptación o no de la hipótesis de igualdad de medias para el ácido sulfhídrico en la deshidratación.....	91
XIV. Aceptación o no de la hipótesis de igualdad de medias para el benceno en la deshidratación.....	92

OBJETIVOS

General

Utilizar técnicas de medida experimental a 6 contaminantes del aire (benceno, tolueno, estireno, cumeno, o-xileno y ácido sulfhídrico) con un detector de compuestos orgánicos volátiles de fotoionización en la estación depuradora de aguas residuales del Ayuntamiento de Padul, Provincia de Granada, y analizar los datos experimentales obtenidos para sacar conclusiones sobre los procesos y superación de límites de exposición ambientales.

Específicos

1. Medir las concentraciones en el aire con un detector de compuestos orgánicos volátiles de fotoionización de 6 compuestos (benceno, tolueno, estireno, ácido sulfhídrico, cumeno y o-xileno) en la estación depuradora de aguas residuales del Ayuntamiento de Padul, Provincia de Granada.
2. Comparar gráficamente las concentraciones medidas con los niveles máximos de exposición laboral propuestos por la Unión Europea (*TWA* y *STEL*) y por el Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo de España (*VLA-CD* y *VLA-ED*).

3. Representar gráficamente por medio de un mapa de la EDAR de Padul las zonas de mayor y menor riesgo de exposición para el operario de planta.

4. Comprobar mediante análisis estadístico de datos la existencia o no de variaciones no aleatorias en las medias de las series de datos de concentraciones diarias en el proceso de deshidratación de fangos, para proponer una metodología de medida de estas concentraciones aceptando o no la opción de un muestreo aleatorio simple temporal.

INTRODUCCIÓN

Las depuradoras de aguas residuales juegan un papel importante en la sostenibilidad del recurso agua pues mejoran la calidad de los vertidos domésticos e industriales a niveles aceptables de parámetros de calidad establecidos por la legislación ambiental de cada país.

Ahora bien, como proceso las estaciones depuradoras de aguas residuales representan un potencial riesgo para la salud de los operadores de planta, así como a la integridad de las instalaciones de la misma, que por la naturaleza de las etapas y de los vertidos realizados al sistema de alcantarillado por parte de una variedad de industrias, se ven expuestos a la presencia de gases tóxicos emitidos o producidos en las fases de operación.

El municipio del Padul de la provincia de Granada cuenta con una estación depuradora de aguas residuales que maneja un caudal aproximado de 3.244.6 metros cúbicos diariamente de aguas servidas provenientes de las actividades domésticas y económicas del municipio, atendiendo las necesidades de 8.270 habitantes. Las principales actividades económicas son la agricultura y la existencia de 420 establecimientos de actividad comercial e industrial según datos del Instituto de Estadística de Andalucía. Fabricas de pintura, de fibra de vidrio y de materiales de construcción que hacen uso de una diversa cantidad de sustancias químicas para sus procesos vierten sus desechos en el sistema, los cuales alcanzan las instalaciones de la planta estando diluidos en el agua residual en diferentes proporciones.

Parte de estas sustancias químicas utilizadas se clasifican dentro del grupo de los Compuestos Orgánicos Volátiles, que por sus propiedades fisicoquímicas pueden incorporarse fácilmente de la fase líquida a la gaseosa, de aquí su mismo nombre volátiles, pues son susceptibles a la volatilización a diferentes condiciones de presión y temperatura. El Benceno, Tolueno, Estireno, O-Xileno y Cumeno son Compuestos orgánicos Volátiles utilizados en las industrias mencionadas anteriormente, que son tóxicos y en algunos casos considerados como agentes cancerígenos o mutágenos de según la clasificación de la IARC y el Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo de España.

Debido a su alto grado de volatilidad estos compuestos se ven favorecidos además por los procesos de acondicionamiento por ciertos mecanismos y factores para pasar de la fase líquida a la sólida y concentrarse en la atmósfera de trabajo del operario, existiendo el riesgo de absorción por inhalación o por la vía cutánea a altas concentraciones en periodos pequeños de tiempo o a concentraciones bajas durante largos periodos de tiempo, ocasionando estas exposiciones daños a la salud del operario a corto y largo plazo o representando riesgo de deterioro a la maquinaria e instalaciones de la estación.

También se debe tomar en cuenta que la acción bacteriana sobre la materia orgánica encontrada en las aguas residuales produce gases, dentro de estos se encuentra el ácido sulfhídrico, categorizado como muy volátil. Este gas por su alta densidad, toxicidad e inflamabilidad representa un riesgo para los trabajadores de las EDAR, pues tiende a desplazar el aire de los lugares donde se encuentre, provocando accidentes como intoxicaciones, incendios o explosiones.

Es necesario mantener un control de las concentraciones de estos compuestos orgánicos volátiles en las EDAR con el fin de tomar las medidas para reducir los niveles de exposición a los que se someten los operarios y también con el objetivo de identificar zonas de riesgo donde las medidas de seguridad deben de ser más rigurosas debido a su peligrosidad.

1. MARCO TEÓRICO

1.1. Las estaciones depuradoras de aguas residuales

Las Estaciones Depuradoras de Aguas Residuales (EDAR) son un conjunto de operaciones y procesos unitarios por los cuales se hace circular el agua residual con el fin de verterla a un cuerpo de agua o directamente al suelo con características físicas, químicas y biológicas que no representen un riesgo de contaminación.

Las operaciones unitarias son los métodos de tratamiento que utilizan fenómenos físicos, mientras que los procesos unitarios son aquellos que utilizan fenómenos químicos y biológicos para la eliminación de contaminantes. Estos se agrupan en 4 diferentes fases principales conocidas como pretratamiento, tratamiento primario, secundario y terciario.

Cada una de las fases del tratamiento de aguas residuales se ve afectada por diferentes problemáticas como: la naturaleza cambiante de la composición de las aguas residuales, el problema de los residuos industriales, las operaciones de tratamiento, procesos y conceptos, la problemática de la salud pública y el medio ambiente, y los pequeños sistemas de tratamiento y sistemas individuales.

La naturaleza cambiante de las aguas residuales se debe a la gran cantidad y variedad de compuestos orgánicos que se sintetizan cada año y que se vierten a los sistemas de recolección. "Estos compuestos aparecen en las aguas residuales de la mayoría de los municipios y comunidades. Hoy en día es

de gran importancia para los sistemas de recogida y tratamiento de las aguas residuales la presencia en las mismas de compuestos orgánicos volátiles (COV). En las plantas de tratamiento es importante el control de los olores y, en particular, el control de la generación de sulfuro de hidrogeno." [5]

Las emisiones de sulfuro de hidrogeno deben de ser muy tomadas en cuenta debido a su peligrosidad medioambiental como agente toxico y por el riesgo que representa para las instalaciones de las estaciones depuradoras. "La liberación del exceso de sulfuro de hidrogeno ha conducido a una importante aceleración en los procesos de corrosión y deterioro de los colectores de hormigón y de las obras de cabecera de planta, junto con un incremento de olores." [5]

Las operaciones y procesos unitarios también se están viendo sometidos a innovaciones y mejoras, así como a minuciosos análisis ya que cada vez aumenta el número de compuestos orgánicos que no son susceptibles a tratamientos convencionales. "La liberación incontrolada de COVs en las plantas de tratamiento puede conducir a la necesidad de cubrir las instalaciones de pretratamiento y tratamiento primario de las plantas, así como la implantación de tratamientos especiales para el proceso de los compuestos que se liberan. En algunos casos puede ser necesario un control previo en origen para eliminar estos compuestos antes de incorporar los residuos a los sistemas de recolección". [5]

La volatilización de estos compuestos se lleva a cabo en las diferentes fases de la descontaminación del agua, pero las concentraciones son más perceptibles y críticas en áreas poco ventiladas que en áreas de superficie abierta. Por esta razón es de suma importancia tener en cuenta los mecanismos y factores que favorecen la volatilización en cada una de las

operaciones y procesos, pues una vez que los COVs se encuentran en estado gaseoso su movilidad es mayor, y aumenta la posibilidad de la liberación al medio ambiente, también la presencia de algunos de estos puede conllevar riesgos a la salud pública, aumentando la cantidad de hidrocarburos reactivos en la atmosfera. "El tratamiento, especialmente en las obras de cabecera de planta, tiene especial importancia por cuanto puede afectar directamente a la salud de los trabajadores tanto de la red de alcantarillado como de las plantas de tratamiento" [5]

Estos operadores se consideran como "el eslabón final y esencial para mantener y proteger la calidad del agua de la que depende la vida" [4] por lo que en el cumplimiento de las funciones de mantenimiento de las instalaciones y maquinaria se ven expuestos a las emisiones de COV y COVT algunas veces en concentraciones de alto riesgo para su salud física y mental, pues los olores que emanan estos compuestos pueden ocasionar trastornos de tipo psicológico y psicosocial.

Para justificar elevadas o bajas concentraciones de COVs en una depuradora es necesario conocer los principios básicos del tratamiento de aguas residuales, así como los factores y mecanismos que contribuyen a la volatilización de estos y de conocer las fuentes de donde estos provienen.

Tabla I. Fuentes y mecanismos de liberación de COV del agua residual a la atmósfera

FUENTE	MECANISMO DE LIBERACIÓN
Vertidos domésticos, industriales y comerciales	Descarga de pequeñas cantidades de COVs al agua residual.

Continuación tabla I

Red de alcantarillado	Volatilización en superficie debida a la turbulencia inducida por el flujo.
Elementos complementarios de la red de alcantarillado	Volatilización debida a la turbulencia en puntos de conexión de conducciones, etc. Volatilización y arrastre por aire en pozos de registro y cámaras de conexión de conducciones.
Estaciones de bombeo	Volatilización y arrastre por aire a la entrada al pozo de bombeo.
Rejas de barras	Volatilización debida a la turbulencia
Dilaceradores	Volatilización debida a la turbulencia.
Aforador Parshall	Volatilización debida a la turbulencia.
Desarenador	En desarenadores convencionales hay un flujo horizontal, volatilización debida a la turbulencia; en desarenadores aireados, volatilización y arrastre por aire.
Tanques de homogeneización	Volatilización en superficie debida a la turbulencia localizada; arrastre por aire en los casos en los que se utilice la difusión de aire.
Tanques de sedimentación primarios y secundarios	Volatilización en superficie; volatilización y arrastre.
Tratamiento biológico	En los procesos de fangos activados con difusión de aire, arrastre por aire; en procesos de fangos activados con aireadores superficiales, volatilización;

	volatilización en superficie debida a fenómenos locales de turbulencia.
Canales de interconexión	Volatilización en superficie debida a la turbulencia local; en canales de interconexión aireados, volatilización y arrastre por aire.

Fuente: METCALF Y EDDY. *Ingeniería de aguas residuales: tratamiento, vertido y reutilización*, p.215.

Las principales fuentes de COVs en aguas residuales según Parkasam Tata (2003) pueden ser:

- Suministro de agua

Los procesos de acondicionamiento de agua para el consumo humano pueden ser precursores de compuestos orgánicos volátiles. "Durante la cloración del agua potable municipal se forma cloroformo" [10] haciendo de los COVs compuestos ubicuos.

- Industrias

Muchos COVs son utilizados en procesos industriales de manufactura, las descargas de estas industrias con contenidos o trazas de COVs son una fuente de los mismos. Estas industrias pueden ser "de manufactura de químicos sintéticos orgánicos, de textiles, petroquímicas, de hule petrosintético, pintura, pesticidas operaciones de remoción de grasas, explosivos y resinas naturales y sintéticas. Uno de los químicos más usados en la industria es el benceno" [10].

- Establecimientos comerciales

Estos establecimientos suelen utilizar una gran cantidad de fluidos para limpieza, solventes y productos que en general contienen COVs, y que de alguna manera se descargan al sistema de alcantarillado, por lo que también contribuyen a la presencia de COVs en las EDAR.

- Productos de limpieza y consumo

Las descargas de los hogares pueden contener gran cantidad de COVs, entre ellos "productos de limpieza como desinfectantes, solventes, *productos de higiene personal, aditivos y fluidos automotrices, productos para jardinería, residuos de pintura, químicos usados para fotografías, medicinas, etc.*" [10]

- Reacciones químicas y biológicas

El ácido sulfhídrico es producido por la descomposición de materia orgánica por lo que esta es su principal fuente de presencia en las EDAR. *Otros gases también son formados por la descomposición metabólica que realizan los microorganismos sobre la carga de contaminantes que llegan a un EDAR.* Además también ocurren transformaciones químicas debido a la interacción de sustancias que no son degradadas biológicamente y que pueden dar origen a COVs.

Desde la publicación en 1990 de las enmiendas a la *Clean Air Act*, de Estados Unidos, comenzó el interés por comprender el impacto de la operación de las EDAR debido a las emisiones de COVs contenidos en las aguas residuales. Diversos estudios han demostrado la "inexistente uniformidad de la concentración y ocurrencia de COVs en efluentes de distintas estaciones. La colección y análisis de muestras en aguas residuales para COVs es difícil y

costosa, por lo que la mayoría de ayuntamientos municipales no cuentan con suficientes recursos para tener un estimado de la carga diaria de los mismos en sus plantas.” [10]

Los estudios han consistido en realizar análisis de la composición de los efluentes de diferentes estaciones depuradoras; uno de ellos realizado en 1993 por la Asociación de Agencias Metropolitanas de Alcantarillado de los Estados Unidos, analizó cuantitativa y cualitativamente los COVs en 181 EDAR, y como resultado creó una tabla donde establece valores indicativos de las posibles concentraciones de algunos COVs en los efluentes de una depuradora típica.

Tabla II. Lista de concentraciones de compuestos tóxicos para el aire de una EDAR indicados por AMSA

CAS	NOMBRE QUIMICO	CONCENTRACION AMSA [µg/l]
1330207	Xilenos (Isómeros y mezclas)	20.99
108883	Tolueno	14.97
100425	Estireno	1.19
71432	Benceno	3.09

Fuente: PARKASAM, TATA. *VOC emissions from wastewater treatment plants*. p. 121.

Esta tabla indica la presencia de estos compuestos en el agua residual que entra a una EDAR en miligramos por litro (µg/l) y son utilizados para realizar balances de masa para calcular las emisiones de una depuradora, mas no calcular las concentraciones en el ambiente laboral de estas.

Es importante comprender los principios básicos de los procesos de tratamiento de aguas residuales antes de considerar la caracterización de las emisiones atmosféricas que se producen en ellos. "El grado de emisiones de cada proceso unitario de una EDAR típica esta impactado tanto por el proceso aguas arriba como por el proceso aguas abajo del mismo, creando una compleja interrelación de causa-efecto en las instalaciones de la planta" [10]

Una vez caracterizadas las fuentes emisoras y si los niveles de emisión de estas ocasionan concentraciones que excedan ciertos límites se puede necesitar implementar medidas regulatorias de control o permisos especiales de construcción. Por lo que es importante tener una descripción del proceso, de los mecanismos de emisión y de los factores que afectan a las emisiones, así como de las variables de distribución de equipos y procesos, ventilación, temperatura, seguridad que se manejen en las instalaciones de una EDAR.

En los siguientes apartados se dará una breve explicación de las diferentes etapas de funcionamiento de una EDAR, dedicando especial atención a aquellas operaciones y procesos donde existe mayor probabilidad de encontrar compuestos orgánicos volátiles. Los tratamientos serán agrupados en dos líneas: la línea de agua, "constituida por todas las fases por las que pasa el agua desde la entrada hasta la salida de la EDAR" (García Martínez, 2009) y la línea de fangos, donde se tratan "los fangos o residuos generados en la línea de agua" [4]

1.1.1. Línea de agua

Se le llama así a las distintas fases por las que pasa el agua residual dentro de una estación depuradora, siendo estas generalmente pretratamiento, tratamiento primario, secundario y algunas veces terciario. En la línea de agua

se retiran del agua residual las sustancias contaminantes y se concentran los fangos o lodos creados en el proceso.

1.1.1.1. Pretratamiento

En esta fase se utilizan y manipulan fenómenos físicos y mecánicos que retiran las sustancias que debido a sus características podrían dañar los equipos de bombeo y disminuir la eficacia de los tratamientos aguas abajo de la planta. Las emisiones de COVs de esta primera etapa de operación pueden ser generadas por varios mecanismos, dependiendo del proceso usado. El desbaste, desarenadores y medidores de caudal generaran emisiones por volatilización desde la superficie por turbulencia. También ocurrirán emisiones debido a la turbulencia generada en caídas del flujo de un nivel alto a uno más bajo en los vertederos. En los desarenadores aireados las emisiones se deben principalmente al arrastre de gases que realizan las burbujas utilizadas en la aireación. El pretratamiento generalmente conlleva las siguientes operaciones:

- **Aliviadero**

Este proceso se encarga de verter el agua residual que sobrepasa el caudal de diseño de una EDAR con lo que se evita sobrecargas en el proceso de desinfección. La volatilización desde la superficie por turbulencia es el mecanismo que aporta mayor cantidad de emisiones en esta unidad.

- **Pozo de Gruesos**

El pozo de gruesos tiene como finalidad eliminar la existencia de sólidos de gran tamaño o cantidades importantes de arena por medio de un pozo de paredes inclinadas que logra concentrar estos en una zona específica donde son removidos diariamente por el operario con una maquinaria conocida como

cuchara anfibia o bivalva. Las emisiones de COVs en el pozo de gruesos se dan principalmente por volatilización desde superficie estática. Estas dos primeras etapas logran eliminar el caudal en exceso y los grandes sólidos y arena que vienen de sistemas de recolección unitarios antes de comenzar el proceso de desinfección.

- **Desbaste**

El desbaste consiste en una serie de rejas que remueven sólidos de tamaño medio por el simple hecho que por su diámetro no puedan pasar a través de ellas. La apertura entre barras varía desde los 10mm hasta los 150mm. Las emisiones producidas en esta parte del proceso son debidas a la turbulencia causada por el flujo que pasa por las rejas. Los residuos que son atrapados en ellas se limpian periódicamente de una forma automática o manual.

Tabla III. Información típica para el proyecto de rejas de barras de limpieza manual y mecánica

CARACTERÍSTICA	LIMPIEZA MANUAL	LIMPIEZA MECÁNICA
Anchura (mm)	5-15	5-15
Profundidad (mm)	25-37.5	25-37.5
Separación barras (mm)	25-50	15-75
Pendiente en relación a la vertical (grados)	30-45	0-30
Velocidad de (m/s)	0.3-0.6	0.6-1.1
Perdida de carga (mm)	150	150

Fuente: METCALF Y EDDY. *Ingeniería de aguas residuales: tratamiento, vertido y reutilización*, p.263.

- Rejas de limpieza manual

Se usan en pequeñas estaciones de bombeo antes de las bombas. La remoción se hace manualmente con un peine rascador manejado por un operario y generalmente cuentan en su parte superior con una placa perforada para almacenar temporalmente los sólidos recogidos para su drenaje. Con el fin de procurar la suficiente superficie de reja las velocidades de aproximación suelen ser bajas, ocasionando menor turbulencia y por ende menor volatilización de COVs.

- Rejas de limpieza mecánica

Se utilizan con el objetivo de reducir los problemas de mantenimiento y para aumentar las posibilidades de separación de residuos. Estas se pueden clasificar a su vez en rejas de funcionamiento mediante cadenas, rejas de movimiento oscilatorio, rejas catenarias y rejas acondicionadas mediante cables.

La turbulencia ocasionada por el paso del flujo del agua residual a través de las rejas es proporcional a la turbulencia producida por las pérdidas de carga y es controlada muchas veces por la instalación de un aforador Parshall aguas abajo de las mismas.

- Tamizado

Los tamices separan sólidos de menor diámetro y cuentan con una separación inferior a los 15mm, estos se emplean generalmente en plantas pequeñas o en plantas donde las pérdidas de carga no constituyan problemas. Las aperturas de tamices oscilan entre los 0.2mm y 6mm y su utilización en el pretratamiento mejora los rendimientos en etapas posteriores. El proceso

consiste básicamente en una filtración sobre un tamiz o soporte perforado y según las dimensiones de los orificios se pueden diferenciar dos tipos, "macrotamizadores, con luz de paso superior a los 0.3mm; y el microtamizado que se realice sobre tela metálica o plástica de malla inferior a 0.1mm" [4]

Según el modo de operación se encuentran varios tipos, entre ellos los tamices estáticos, los rotatorios o rototamices y los tamices deslizantes. Las pérdidas de carga pueden variar entre 0.8 a 1.4m [5] produciendo turbulencias que favorecen la volatilización desde la superficie de los COVs.

- Desarenadores

Los desarenadores sirven para remover materiales constituidos de sustancias como arena, grava, cenizas y otros materiales que poseen pesos específicos o velocidades de sedimentación superiores a los de la materia orgánica disuelta y coloidal encontrada en el agua residual. Los tres objetivos principales de un desarenador son "proteger los elementos mecánicos móviles de la abrasión y excesivo desgaste; reducir la formación de depósitos pesados en el interior de las tuberías, canales y conducciones; y la reducción de la frecuencia de limpieza de los digestores provocada por la excesiva acumulación de arenas" [5]

Los desarenadores más frecuentemente encontrados en EDARs son los canales desarenadores estáticos y los desarenadores aireados. "Las emisiones de los canales aireados son siempre mayores a las de canales estáticos" [10], pues las burbujas inducidas favorecen el arrastre de gases hacia la superficie y su posterior volatilización al llegar al límite de la fase líquida. En los canales estáticos la volatilización desde superficie es casi despreciable debido a la pequeña área superficial que estos presentan, ahora bien las emisiones de COVs relacionadas a este tipo de canales se da generalmente en los

cambios de nivel en la caída del flujo. El control de la velocidad de flujo en los canales desarenadores es esencial, y este se logra manipulando la geometría de los mismos.

- **Desgrasadores**

El funcionamiento de esta operación es bastante similar a la de los desarenadores y suelen estar juntas una después de otra en una EDAR. La diferencia radica en que la separación se hace por medio de flotación ya que las grasas y aceites poseen una densidad inferior a la del agua. El agua residual circula por una cámara o canal, diseñado para reducir la velocidad a valores adecuados que permitan extraer grasas y aceites por flotación. En algunos casos se utiliza la inyección de aire para favorecer el proceso, rompiendo las emulsiones de las grasas, arrastrando hacia la superficie partículas ligeras, entre ellas algunos COVs.

1.1.1.2. Tratamiento primario

El tratamiento primario consiste en la separación de sólidos, no retenidos en el pretratamiento, grasas y aceites por medios físicos o químicos, además de comenzar a reducir la carga orgánica para los tratamientos posteriores.

- **Sedimentación**

- **Decantadores primarios**

Estos son tanques o depósitos donde la velocidad de paso se reduce drásticamente permitiendo que los sólidos se depositen en el fondo, a estos sedimentos se les conoce como fangos primarios. El tamaño del tanque incide sobre el tiempo de retención y este a su vez sobre la eficacia de remoción de material sedimentable. El tiempo de

retención del agua en los decantadores primarios es normalmente de una hora y media a dos horas.

La forma de estos tanques puede ser rectangular o circular y cuentan con un sistema de rasquetas de superficie y de fondo que recogen los sobrenadantes y los fangos primarios respectivamente. El agua clarificada de la superficie fluye fuera del decantador por un vertedero, que es diseñado para que el agua salga lentamente para evitar turbulencias que ocasionen que los sedimentos tiendan a reflotar.

- Tanques Imhoff y decantadores digestores

Estos son tanques que cuentan con dos zonas, la primera y superior funciona como un decantador primario, y la parte inferior, que recibe los sedimentos, los estabiliza mediante un proceso de digestión anaerobia. El diseño del tanque impide que los gases generados en la digestión ingresen a la cámara de sedimentación, sin obstruir este proceso. "Este sistema se utiliza como tratamiento previo a sistemas de aplicación al terreno y, en el caso de pequeñas instalaciones, como tratamiento primario previo a contactores biológicos rotativos o lechos bacterianos". [4] La forma de estos tanques puede ser rectangular o circular.

- Lagunas anaerobias

En este sistema de depuración se tratan de reproducir los fenómenos de autodepuración que se dan en forma natural en ríos y lagos. Existen tres principales tipos de lagunas de acuerdo al tipo de reacciones que se producen en ellas: las anaerobias, facultativas y de maduración.

reacciones que se producen en ellas: las anaerobias, facultativas y de maduración.

Las lagunas anaerobias, son lagunas profundas en que, salvo su capa superficial, existen condiciones de ausencia de oxígeno, dando lugar a reacciones anaerobias por parte de bacterias de este tipo. "Los lodos decantados experimentan reacciones de degradación anaerobia, por lo que se van mineralizando (aumentando la relación mineral/volátil) a la vez que disminuyen su volumen." [4]

En general las emisiones de COVs en estas primeras dos fases de operación pueden ser generadas por varios mecanismos, la volatilización desde superficie turbulenta, la volatilización desde superficies estáticas, la volatilización por turbulencia generada en caídas del caudal de un nivel alto a un mas bajo, y el arrastre de gases por burbujas de aire generadas en los procesos de aireación.

Los factores que afectan las emisiones en las fases de pretratamiento y tratamiento primario son según Parkasa Tata (2003) [10]:

- Presión de vapor

Los COVs con valores altos de presión de vapor se volatilizan más que los que tienen valores bajos.

- Superficie

Mientras más superficie expuesta a la atmosfera tenga el proceso mayores emisiones se pueden esperar.

- Coberturas/Ventilación

En procesos cubiertos las emisiones serán menores y los COVs se mantendrán en solución en el agua residual.

- Otras variables

Existiendo iguales condiciones los tiempos de retención mayores así como las temperaturas elevadas darán lugar a más emisiones de COVs.

Algunas EDAR, como la de Padul, que utilizan como tratamiento secundario un fango activado por aireación prolongada, no tienen tratamiento primario, sino que el agua residual pasa directamente del pretratamiento al reactor biológico.

1.1.1.3. Tratamiento secundario

En el tratamiento secundario o biológico, microorganismos de diferentes tipos utilizan el oxígeno para metabolizar y remover sustancias orgánicas que ejercen una demanda de oxígeno. “La materia orgánica que se encuentra disponible como comida para estos microorganismos los provee de carbono y energía para producir sus tejidos microbianos”. [10] Existen diferentes tipos de reactores biológicos dependiendo del medio donde se desarrolla el cultivo bacteriano, ya sea en suspensión o fijo, y de la presencia o no de oxígeno en el proceso. El proceso de tratamiento biológico consiste principalmente en controlar el ambiente donde se desarrollan los microorganismos para garantizar condiciones óptimas de crecimiento y por consiguiente de depuración.

- Fangos activos

Este proceso es considerado como un tratamiento aerobio de cultivo en suspensión. “Los fangos activados son el proceso de tratamiento biológico más

utilizado en muchas EDAR. Consisten en una suspensión de flóculos formados por microorganismos, tanto vivos como muertos, en una solución que contiene materiales orgánicos e inorgánicos en suspensiones coloidales y disueltos." [10] Esto quiere decir que el principio de funcionamiento del sistema se basa en la oxidación biológica de la materia orgánica que no ha sido removida en los procesos anteriores. Al reproducirse las bacterias forman conglomerados que al aumentar en tamaño obtienen el peso suficiente para poder sedimentar después en un decantador secundario, donde son removidos y una parte son recirculados al reactor para que continúen metabolizando materia orgánica y produciendo mas microorganismos.

Este ambiente aerobio favorable se logra utilizando aireadores mecánicos o difusores, que también garantizan una mezcla completa y evitan la sedimentación en el tanque. En los reactores biológicos el nivel de emisiones de COVs dependerá principalmente del tipo de sistema de aireación utilizado para aportar oxígeno al sistema, entre estos están los sistemas de difusión, aireación mecánica e inyección de oxígeno puro.

Existen principalmente tres mecanismos por los cuales se emiten o dejan de emitirse COVs desde los reactores de fangos activos, la volatilización desde superficies estables y turbulentas, la absorción o adsorción a los lodos y la biodegradación. La volatilización será siempre el mecanismo dominante en las emisiones de COVs en una EDAR, especialmente en los procesos donde no exista la posibilidad de absorción, adsorción o biodegradación. Sin embargo, debido a que los procesos biológicos involucran microorganismos que metabolizan y degradan muchos COVs, la biodegradación juega un papel importante en la magnitud de emisiones, así como también lo juega la absorción o adsorción a los fangos formados.

Este fenómeno físico depende principalmente de la capacidad de cada compuesto a absorberse o adsorberse. Estos dos últimos fenómenos más que emitir evitan la emisión de algunos COVs, pero al ser absorbidos o adsorbidos en los fangos pueden aparecer en procesos posteriores que involucren el tratamiento de los mismos.

- **Proceso de digestión anaerobia de mezcla completa**

Este proceso es utilizado comúnmente en conjunto con el proceso aerobio, y se refiere a los procesos de descomposición de materia orgánica e inorgánica en ausencia de oxígeno molecular. Sus principales aplicaciones son la estabilización de fangos concentrados producidos en el tratamiento del agua residual y de determinados residuos industriales. El proceso de descomposición se lleva a cabo en tres etapas, la primera "la transformación por vía enzimática (hidrólisis) de los compuestos de alto peso molecular en compuestos que puedan servir como fuentes de energía y de carbono celular. La segunda (acidogénesis), implica la conversión bacteriana de los compuestos producidos en la primera etapa en compuestos intermedios identificables de menor peso molecular. La tercera etapa (metanogénesis), supone la conversión bacteriana de los compuestos intermedios en productos finales más simples, principalmente metano y dióxido de carbono". [5] Esta etapa supone la formación durante el proceso de ácido sulfhídrico, y su destino es regido por la volatilización desde superficie estática y la absorción o adsorción en los fangos formados.

- **Procesos aerobios de tratamiento de cultivo fijo**

Estos procesos son utilizados principalmente para la remoción de materia orgánica o para procesos de nitrificación. Entre estos se pueden mencionar dos principales, los filtros percoladores y los biodiscos. El contacto del agua residual

con las películas de microorganismos formadas en su superficie ocasiona la absorción de los contaminantes y su posterior biodegradación, haciendo que esta película crezca especialmente en las regiones superiores de los dispositivos. Los mecanismos de emisión son principalmente la volatilización de superficies turbulentas al percolarse por los medios. "Algunos estudios han demostrado que los filtros percoladores producen emisiones mayores de COVs que los biodiscos." [10]

- **Decantadores secundarios**

Un decantador secundario es el proceso por el cual los sólidos suspendidos en el licor mezcla son distribuidos en un tanque, al fondo del cual se depositan sedimentados y son recogidos en el fondo por medio del uso de frascetas especiales. Una parte es recirculada al reactor biológico y el resto es bombeada hacia la línea de fangos. Las emisiones de la superficie son muy pequeñas y la absorción y adsorción juegan un papel importante para que COVs puedan aparecer posteriormente en el tratamiento de fangos.

1.1.1.4. Tratamiento terciario

Esta fase del proceso de tratamiento de aguas residuales es muy poco común en plantas de pequeño tamaño, y no es necesario en otras debido a las distintas regulaciones existentes en relación a parámetros de descarga de aguas residuales.

Los tratamientos terciarios se usan sobre todo cuando se pretende la posterior reutilización del agua y trata de un proceso de desinfección con fines distintos a los alcanzados biológicamente. Principalmente se eliminan nitrógeno y fósforo considerados como nutrientes, esto se logra con el uso de membranas, procesos de intercambio iónico, adsorción con carbón activo,

procesos de oxidación y reducción, precipitación química, cloración, ozono entre otros.

La cloración puede ser una fuente de emisiones de COVs debido a que durante las condiciones de mezcla del gas cloro con el agua residual se pueden ocasionar turbulencias que generen volatilización.

1.1.2. Línea de fangos

Los fangos formados en la línea de agua son un líquido semisólido con un contenido variable en sólidos de 0.25 al 12% en peso, es decir que solo una pequeña parte está compuesta por materia sólida. La línea de fangos es una serie de procesos y aplicaciones utilizadas para reducir el contenido de agua y materia orgánica del fango y acondicionarlo para su reutilización o evacuación final. Los diferentes procesos de tratamiento de fangos pueden llevarse a cabo en instalaciones cerradas como edificios o en instalaciones abiertas al aire libre. Esta característica determinara las concentraciones de COVs en los lugares donde se lleven a cabo.

1.1.2.1. Pretratamiento

Esta primera fase consigue que la alimentación de fango a las instalaciones de tratamiento sea constante y homogénea.

- **Dilaceración**

En esta fase los sólidos de gran tamaño contenidos en el fango son cortados y triturados en partículas mas pequeñas para evitar obstrucciones y *daño en los equipos rotatorios.*

- **Desarenado del fango**

En algunos casos es necesario desarenar el fango antes de proceder a su tratamiento, el desarenado se lleva a cabo por medio de desarenadores de ciclón, que utilizan la fuerza centrífuga para separar la arena del fango.

- **Mezclado**

Debido a que el fango formado en los diferentes procesos y operaciones de la línea de agua tiene diferentes características y composición es necesario mezclarlo para que llegue como un material uniforme a su tratamiento.

Como primera fase del acondicionamiento de fangos estos deben de ser concentrados para reducir su volumen, es decir espesados. Para este objetivo se pueden utilizar el espesamiento por gravedad, que consiste en introducir en un tanque los sólidos y después de un tiempo de retención por su propio peso tienden a concentrarse. también se utiliza la flotación o decantación en función del material que acompaña al agua en el fango.

1.1.2.2. Espesado

El espesado se utiliza para aumentar el contenido de sólidos del fango por eliminación de parte de la fracción líquida del mismo. La reducción del volumen es favorable para los procesos subsiguientes de tratamiento pues afecta la capacidad de tanques y equipos, la cantidad de reactivos necesarios para el acondicionamiento y la cantidad de calor necesario en los digestores. Existen distintos equipos de espesado, entre ellos el espesado por gravedad, espesado por flotación, espesado por centrifugación y espesadores de tambor rotativo.

- **Espesado por gravedad**

El fango se introduce en un tanque generalmente circular, donde sedimenta y compacta, y es retirado del fondo por medio de una rasqueta mecánica especial.

- **Espesado por flotación**

Existen tres procesos de espesado por flotación: por aire disuelto, flotación al vacío y flotación por dispersión de aire. Las burbujas formadas en la *inyección del aire arrastran el fango, el cual es eliminado.*

1.1.2.3. Estabilización

La estabilización se realiza para reducir la presencia de patógenos en el fango, eliminar olores desagradables e inhibir, reducir o eliminar, su potencial putrefacción. Los medios de estabilización que se utilizan son la reducción biológica del contenido de materia volátil, la oxidación química de la materia volátil, la adición de agentes químicos para inhibir el crecimiento de microorganismos y la aplicación de calor para esterilizar el fango.

1.1.2.4. Deshidratación

La deshidratación es una operación unitaria física, que pretende reducir el contenido de humedad del fango para reducir los costes de transporte, facilitar su manipulación, acondicionarlo para su posterior incineración, evitar la generación de olores y reducir la formación de lixiviados en los lugares de deposición final. Para la deshidratación se utilizan una serie de aparatos de deshidratación mecánica como la filtración, el prensado, extracción por vacío y

centrifugación. Los equipos se seleccionan dependiendo del tipo de fango a tratar y del espacio disponible.

El proceso de centrifugación utiliza dos tipos de centrifuga, la de camisa maciza y la centrifugas de cesta. La superficie de instalación de centrifugas es menor que la de otros sistemas de deshidratación de fango.

Los COVs pueden ser emitidos durante el proceso de deshidratación, y las emisiones suelen ser bajas debido a la remoción de estos en etapas previas. Principalmente los niveles de emisiones dependen de la cobertura o no del equipo, así como del contenido de materia sólida de los fangos.

1.2. La estación depuradora de aguas residuales de Padul

Padul es un municipio de la Provincia de Granada ubicado a 13km al sur de la ciudad de Granada. Cuenta con una extensión territorial de 89km² y una población de 8,270 personas, según el Instituto de Estadística y Cartografía de Andalucía, para el año 2010.

Las principales actividades económicas son la agricultura y la actividad comercial e industrial, contando con alrededor de 420 establecimientos de este tipo. Los desechos líquidos generados por estas actividades domésticas y económicas son recolectados y conducidos a la estación de tratamiento de aguas residuales manejada por el Ayuntamiento de Padul y monitoreada por la Consejería de Medio Ambiente de la Junta de Andalucía. El agua tratada es vertida hacia la laguna de El Padul, que es un humedal de importancia que alberga diversas especies consideradas vulnerables.

Según los datos recopilados la planta recibe aproximadamente un caudal diario de 3,244.6m³ de aguas residuales, que debido a su procedencia contienen en su haber una serie de contaminantes de los cuales un cierto porcentaje es susceptible a la volatilización debido a sus propiedades físicas y químicas y también, debido a algunas condiciones externas como temperatura, humedad, concentración de contaminantes de fondo, condiciones de flujo, etc. Una vez en el aire estos contaminantes evolucionan de distintas maneras, acumulándose en las zonas de trabajo del operario de planta o difundiéndose en la atmósfera reaccionando fotoquímicamente y formando contaminantes secundarios que pueden tener grados de toxicidad mayores o menores que el contaminante original.

Tabla IV. Caudales de operación de la EDAR de Padul

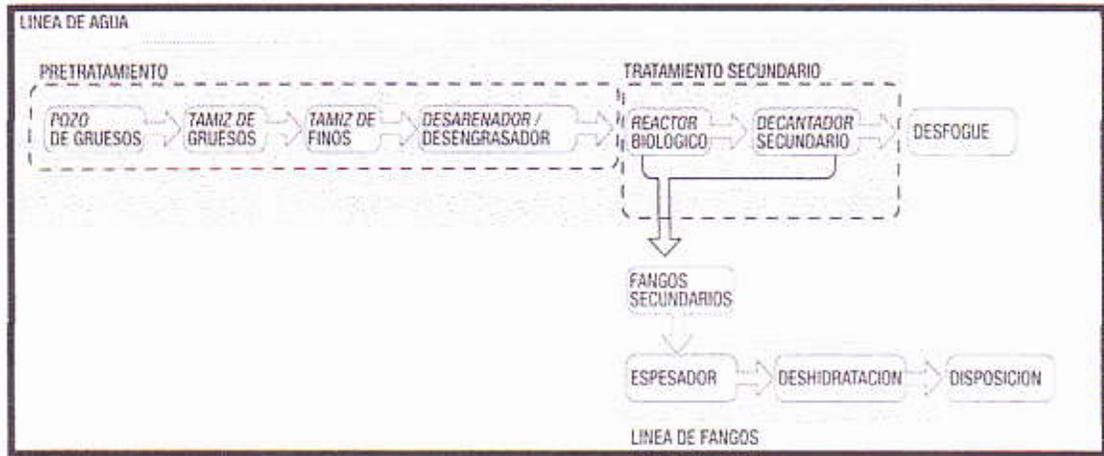
MES	CAUDAL TOTAL [m ³ /dia]	MEDIA DIARIA [m ³ /dia]
Noviembre 2010	97,148	3 238,27
Diciembre 2010	110,813	3 574,61
Enero 2011	98,955	3 298,50
Febrero 2011	88,401	3 157,18
Marzo 2011	100,737	3 357,90
Abril 2011	85,239	2 841,30
	PROMEDIO	3 244,60

Fuente: base de datos de la EDAR de Padul, datos proporcionados por el operario.

Cuando el agua residual alcanza la estación de depuración entra a la fase de Pretratamiento, que consiste en la etapa de predesbaste, desbaste, tamizado, desarenado y desengrasado. Esta fase de tratamiento se encuentra

instalada en el interior de un edificio, donde comparte espacio con la centrífuga destinada para la deshidratación de fangos.

Figura 1. Diagrama de Bloques de la EDAR de Padul



Fuente: elaboración propia.

El pozo de gruesos localizado en la cabecera de la planta requiere un mantenimiento diario por parte del operario, que realiza la limpieza con una cuchara bivalva. Esta operación de mantenimiento ocupa alrededor de 30 a 45 minutos diarios. Del aliviadero y pozo de gruesos el agua pasa por una reja de diámetro de 10 cm de abertura y luego pasa a la fase de tamizado. En esta fase el operario de planta realiza mantenimiento a los motores utilizados para la limpieza automática, así como la remoción de materiales que suelen quedar atrapados, el tiempo de esta labor suele ser variado.

El tamizado consiste en una serie de dos tamices, uno de gruesos y el otro de finos, cuya limpieza se realiza automáticamente y los desechos generados son llevados por una cinta transportadora hacia un contenedor que es recolectado periódicamente. Luego el agua residual llega a un pozo de

bombeo que la lleva hacia el desarenador y desengrasador. Las arenas y las grasas removidas son desechadas en contenedores que también son recolectados periódicamente y dispuestos en otro sitio.

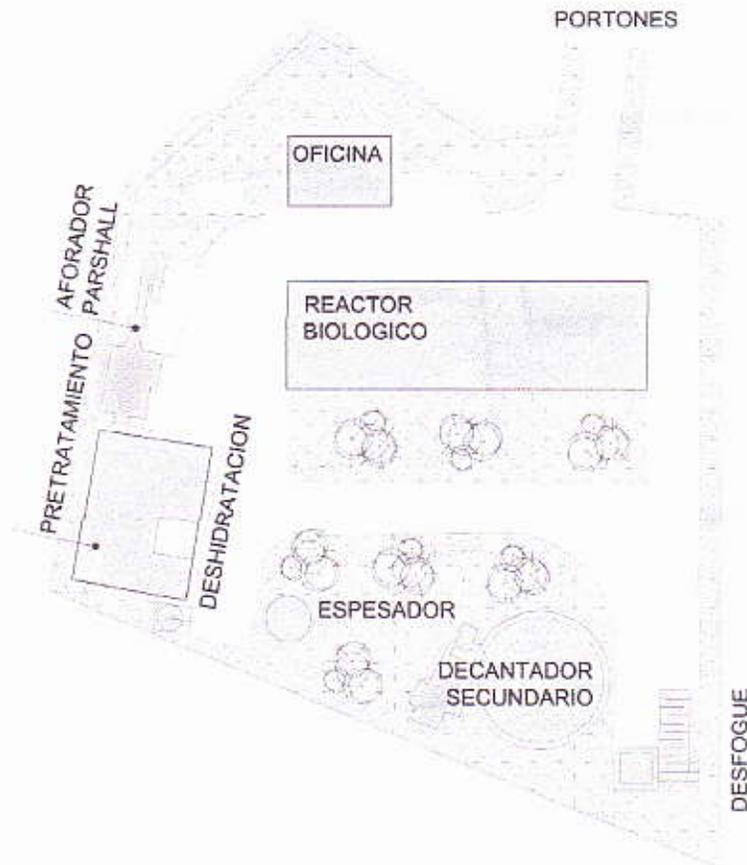
La planta de Padul no cuenta con un sistema de tratamiento primario, del desarenador y desengrasador el agua residual pasa por un canal de aforo Parshall de medición automatizada, y llega directamente al tratamiento secundario en un reactor de fangos activos de baja carga y aireación prolongada. La aireación en el tanque es mecánica usando 5 aireadores de eje vertical.

Después de un tiempo de contacto suficiente en el agua pasa a un decantador secundario donde se forman los lodos que son bombeados hacia un espesador por gravedad y otra parte es recirculada al reactor biológico. El papel del operario es el la supervisión del buen funcionamiento de los agitadores, así como la toma de muestras del reactor diariamente, realizando ésta en la parte central del tanque. De los vertederos del decantador secundario, el agua es conducida hacia un tanque y luego vertida finalmente directamente al suelo y conducida hacia la laguna.

Los lodos que pasaron al espesador después de un tiempo de residencia en el son bombeados hacia el proceso de deshidratación, que consiste en una centrifuga de camisa maciza de altas revoluciones que trabaja en el cuarto central del edificio de maquinas que alberga el pretratamiento, desarenador y desengrasador y el proceso de deshidratación. En la deshidratación el operario realiza tareas de mantenimiento, que consisten en el engrase de la centrífuga, y la revisión del funcionamiento y realización de servicios de la máquina de polímeros que se le agrega al fango para su eficaz deshidratación.

La distribución de las instalaciones de la EDAR de Padul se presenta en la figura 2 a nivel general. Los puntos más frecuentados por el operario suelen ser el edificio, donde se encuentra el pretratamiento, desarenador, desengrasador y deshidratación de fangos; el reactor biológico localizado en la parte central abierto a la atmósfera y el espesador, localizado frente al tratamiento secundario.

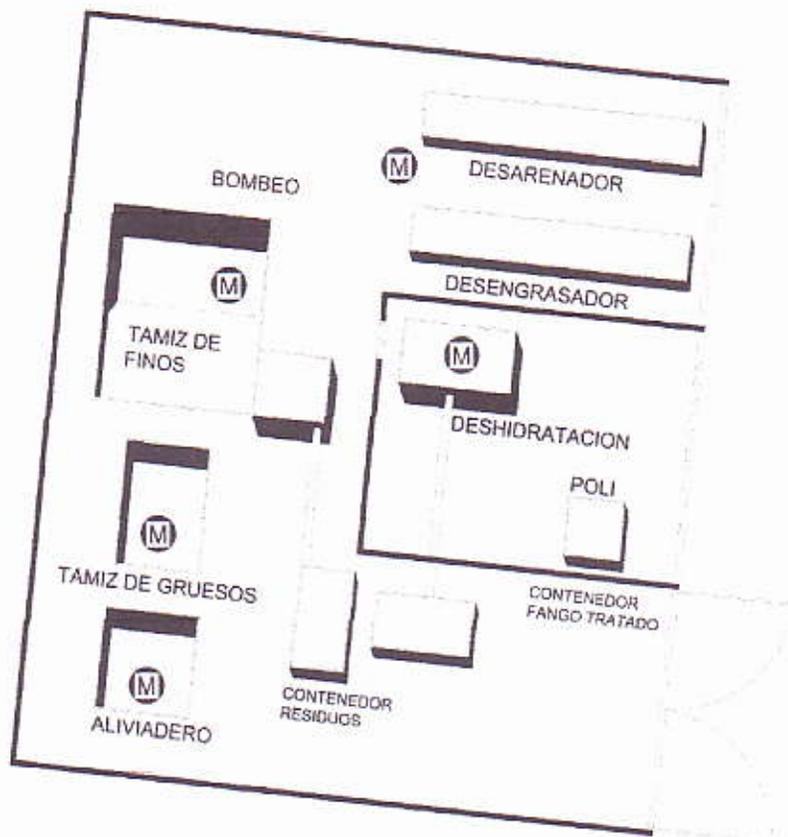
Figura 2. Esquema general de la EDAR de Padul



Fuente: elaboración propia.

Dentro del edificio se encuentran en funcionamiento maquinaria, entre ella motores eléctricos, bombas, sopladores y la centrifuga para la deshidratación. La distribución se presenta en la figura 3.

Figura 3. Distribución espacial del edificio y puntos de muestreo



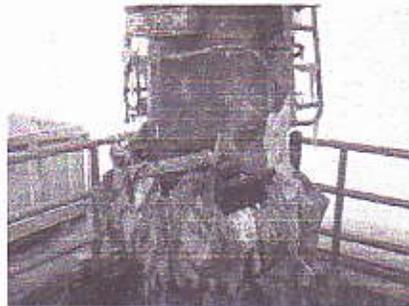
Fuente: elaboración propia.

Figura 4. **Pozo de gruesos y aliviadero**



Fuente: elaboración propia.

Figura 5. **Cuchara bivalva del pozo de gruesos**



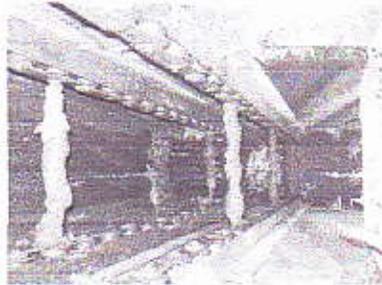
Fuente: elaboración propia.

Figura 6. **Tamiz de gruesos**



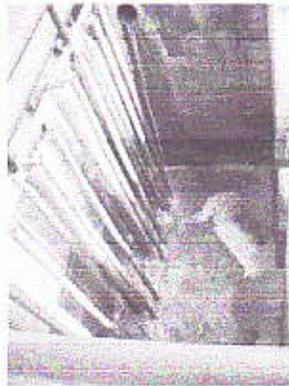
Fuente: elaboración propia.

Figura 7. **Tamiz de finos**



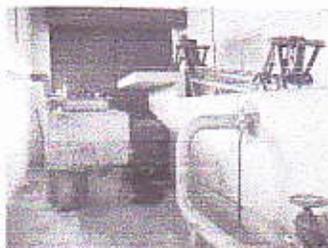
Fuente: elaboración propia.

Figura 8. **Pozo de bombeo**



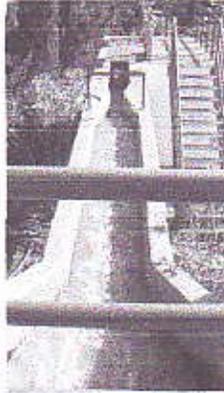
Fuente: elaboración propia.

Figura 9. **Desarenador y desgrasador**



Fuente: elaboración propia.

Figura 10. **Aforador Parshall**



Fuente: elaboración propia.

Figura 11. **Canal de homogenización**



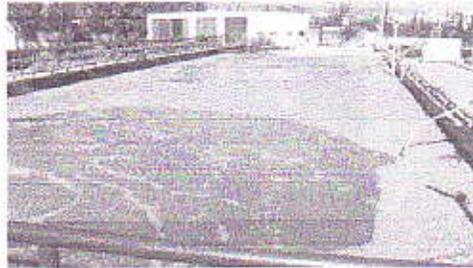
Fuente: elaboración propia.

Figura 12. **Reactor biológico**



Fuente: elaboración propia.

Figura 13. **Reactor biológico sección aeróbica**



Fuente: elaboración propia.

Figura 14. **Reactor biológico sección anaeróbica**



Fuente: elaboración propia.

Figura 15. **Sedimentador secundario**



Fuente: elaboración propia.

Figura 16. **Vertedero del decantador secundario**



Fuente: elaboración propia.

Figura 17. **Rasqueta del sedimentador secundario**



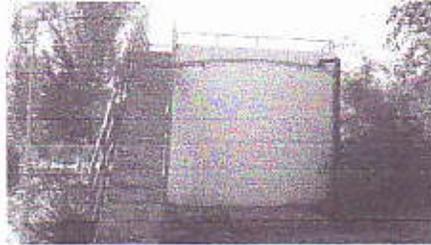
Fuente: elaboración propia.

Figura 18. **Salida de la planta del agua tratada**



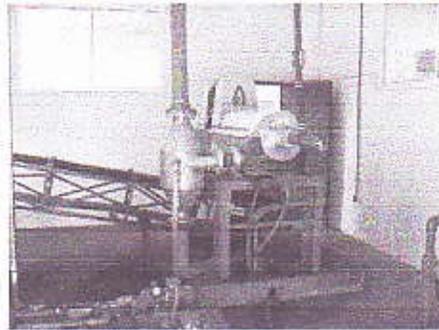
Fuente: elaboración propia.

Figura 19. **Espesador de lodos por gravedad**



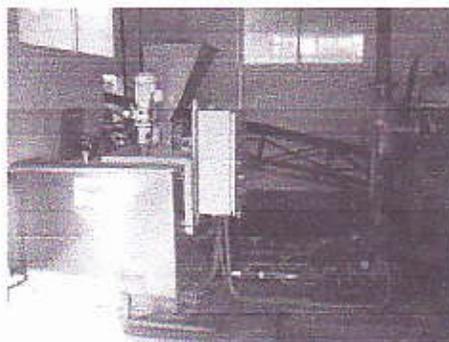
Fuente: elaboración propia.

Figura 20. **Centrífuga de deshidratación**



Fuente: elaboración propia

Figura 21. **Máquina de polímero**



Fuente: elaboración propia

Figura 22. **Desagüe de la centrifuga**



Fuente: elaboración propia.

Figura 23. **Ubicación de la centrifuga**



Fuente: elaboración propia.

Figura 24. **Salida de lodo estabilizado**



Fuente: elaboración propia.

Figura 25. **Localización del contenedor de recolección**



Fuente: elaboración propia.

1.3. Compuestos orgánicos volátiles

Cuando una sustancia es vertida al medio ambiente su evolución depende de los diferentes medios en los que se encuentre, pues los mecanismos de degradación, difusión y transporte de la misma pueden ser muy variados. Uno de los principales mecanismos de difusión y transporte de compuestos es conocido como volatilización, y que un compuesto sea susceptible al mecanismo depende de diversos factores relacionados con la estructura de la sustancia y sus propiedades fisicoquímicas, además de las condiciones atmosféricas o localización geográfica en la que suceda el fenómeno. La volatilización se puede decir entonces que es el mecanismo por el cual una sustancia pasa de la fase líquida o sólida a la fase gaseosa.

La volatilización de sustancias a la tropósfera se puede describir como "un ciclo de transporte a larga distancia y redistribución" [6] Al volatilizarse un líquido o un sólido, sus moléculas ejercen presión sobre la superficie del líquido, la cual "es proporcional al número de moléculas que se encuentran en fase de vapor, esta presión ejercida por las moléculas en fase gaseosa sobre la

superficie del líquido en el punto de equilibrio se denomina presión de vapor. La presión de vapor es constante a una temperatura dada.” [6] Debido a lo anteriormente expuesto es posible clasificar la susceptibilidad a la volatilización de un compuesto dependiendo de su presión de vapor a ciertas condiciones ambientales. La volatilización de una sustancia puede producirse directamente desde el suelo, pero es mucho más frecuente que tenga lugar desde un medio acuoso donde se encuentre disuelta.

Los compuestos orgánicos volátiles son compuestos, como su nombre lo indica, que poseen esta propiedad y “probablemente constituyen la segunda clase más extendida y diversa de emisiones, después de las partículas.” [1]

1.3.1. Definición

Los compuestos orgánicos volátiles son una diversa variedad de compuestos químicos líquidos o sólidos que contienen carbono orgánico y que poseen distintos grados de volatilidad y liposolubilidad, por lo que pueden ser absorbidos por cualquiera de las vías de interés medioambientales como lo son la ingestión, la vía cutánea y especialmente la inhalación.

La liberación de COVs de la superficie de aguas residuales a la atmósfera se conoce con el término de volatilización, y debido a que las concentraciones de estos compuestos en la atmósfera es muy baja, la transferencia de COVs se produce desde el agua a la atmósfera.

Existen diversas definiciones de los compuestos orgánicos volátiles, que utilizan la presión de vapor o el punto de ebullición para clasificarlos por su grado de volatilidad. Entre ellas se encuentran las siguientes:

- “Los COVs son aquellos líquidos o sólidos orgánicos cuyas presiones de vapor a las temperaturas ambiente son mayores que alrededor de 0.0007 atmósferas y cuyos puntos de ebullición atmosférica son hasta más o menos 260C; lo cual implica la mayor parte de los compuestos orgánicos con menos de alrededor de 12 átomos de carbono.” [1]
- Según la Directiva 1999/13 de la Unión Europea “un compuesto orgánico volátil es todo compuesto orgánico que tenga a 293.15 K una presión de vapor de 0.01KPa o mas, o que tenga una volatilidad equivalente en las condiciones particulares de uso”.
- Según la Agencia de Protección al Medio Ambiente de Estados Unidos (EPA) un COV es un compuesto orgánico que tiene un punto de ebullición menor o igual a 250 C medido en condiciones estándar de presión atmosférica de 101.3KPa.
- “En conjunto, las sustancias que se evaporan fácilmente, incluidos los hidrocarburos y sus derivados, se denominan compuestos orgánicos volátiles, o COVs.’ [7]

En esta última definición presentada el ácido sulfhídrico se puede categorizar como un COV pues posee una elevadísima presión de vapor que hace que se volatilice con gran facilidad al estar diluido en un medio acuoso.

Para clasificar a estos compuestos, según su grado de volatilidad, la OMS propone la tabla V que utiliza los puntos de ebullición como criterio:

Tabla V. Clasificación de contaminantes orgánicos (OMS 1989)

	DESCRIPCIÓN	PTO. EBULLICIÓN [°C]
VVOC	muy volátil	<0 a 50-100
VOC	Volátil	50-100 a 240-260
SVOC	semi volátil	240-260 a 380-400

Fuente: *Total Volatil Organic Compounds (TOVC) in indoor quality investigations*1997 [13]

También la EPA provee unos criterios de clasificación basándose en las presiones de vapor de cada sustancia, presentadas en la tabla VI.

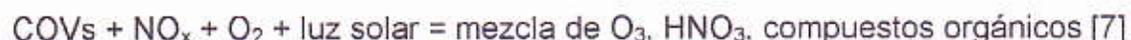
Tabla VI. Clasificación de COVs EPA

	PRESIÓN DE VAPOR [kpa]
Volátiles	>0.13
Semi volátiles	$0.1-10^{-7}$
No volátiles	$< 10^{-7}$

Fuente: *VOCs Technical Overview (www.epa.gov)*

Los COVs poseen muy variadas aplicaciones en procesos de manufactura como en productos de uso diario en el hogar y el comercio, "se utilizan ampliamente como combustibles líquidos, solventes o productos intermedios en la industria química." [1] Los COVs que se usan como disolventes pueden ser halogenados y no halogenados, incidiendo esto en aumentar o disminuir sus características toxicas y su nivel de persistencia en el

ambiente, además de condicionar las reacciones en las que participarán una vez sean liberados en la atmósfera y entren en contacto con la luz solar y con otros contaminantes o los mismos componentes naturales del aire. Esta interacción se puede resumir con la ecuación propuesta por Colin Baird:



Por lo que su emisión descontrolada se puede relacionar con los problemas de contaminación por ozono troposférico, lluvia ácida y smog fotoquímico. También "algunos de los COVs son poderosos absorbentes del infrarrojo, y de este modo, contribuyen a la producción del problema de invernadero". [1]

Como contaminantes primarios los COVs son considerados en algunos casos tóxicos o cancerígenos teniendo efectos agudos o crónicos en las personas expuestas, especialmente aquellas que respiran niveles que pueden llegar a rebasar los límites de exposición permisibles en atmósferas interiores de trabajo. "La inhalación en forma aguda de vapores de disolvente posee efectos depresores del sistema nervioso central, y la exposición prolongada a concentraciones elevadas de dichos vapores provoca neuropatías irreversible. Mucho más controvertidos son los efectos adversos a la exposición a estos vapores en bajas concentraciones de forma crónica, como puede ocurrir en la exposición profesional". [8]

Los COVs tienden a atacar los tejidos de las membranas mucosas de los ojos, nariz y garganta, la piel de la cara, manos y cuello y las vías respiratorias en general. La mayoría de los efectos observados bajo condiciones controladas parecen ser de naturaleza aguda y pueden mostrar cierto nivel de adaptación

olfativa. Otros efectos como el dolor de cabeza son de naturaleza sub-aguda y tienden a aumentar en frecuencia e intensidad con el tiempo. [13]

1.3.2. Benceno

El benceno es un compuesto muy volátil (presión de vapor 10KPa a 20C) por lo que la volatilización es el proceso más importante de emisión. Se evapora fácilmente desde la superficie de suelos y aguas. "El tiempo de vida media por volatilización estimado en ríos y lagos es de 1 hora y 3.5 días, respectivamente" [8]

El vapor de benceno reacciona en el aire con radicales hidroxilo, con un tiempo de vida media para este mecanismo de degradación de 13 días.

Es soluble en agua, por lo que es fácilmente arrastrado por la lluvia (solubilidad, 1.790 mg/L a 25C). Su movilidad en el suelo es elevada y posee poca tendencia a adsorberse en suelos y sedimentos.

"La biodegradación del benceno en medio anaerobio parece ser muy lenta, tanto en suelos como en aguas, por lo que esta ruta de transformación medioambiental no es importante. Tampoco experimenta hidrólisis en el medio ambiente." [8]

La absorción de benceno tiene lugar por inhalación, por ingestión y por vía cutánea. La ruta de exposición mas importante es la inhalación, aunque la ingestión también es una vía eficaz de absorción. Casi el 50-60% de benceno absorbido se exhala sin metabolizar.

Tras alcanzar el torrente sanguíneo, el benceno se distribuye por todos los tejidos del organismo, alcanzando las concentraciones más elevadas en los tejidos con alto contenido en lípidos y el sistema nervioso central.

1.3.2.1. Aplicaciones

Principalmente el benceno se utiliza como intermediario en la producción de productos químicos y como disolvente, además de haber sido utilizado en el pasado ampliamente como combustible combinado con la gasolina.

El benceno se usa para disolvente de grasas, aceites y pinturas, en el grabado fotográfico de impresiones, como constituyente de combustibles para motores, en la manufactura de detergentes, explosivos, productos farmacéuticos y tinturas.

1.3.2.2. Toxicidad

“El principal efecto toxicológico es su actividad cancerígena, como agente causal de la leucemia. Por otra parte, el efecto tóxico no cancerígeno más importante del benceno sobre el sistema hematopoyético es la anemia aplásica.” [8]

La hematoxicidad del benceno se manifiesta en la médula ósea, produciendo una destrucción progresiva de sus componentes mieloides y eritroides, lo que se traduce en un descenso marcado de plaquetas y hematíes en sangre. Las lesiones en la médula ósea causadas por la exposición al benceno presentan un comportamiento dosis-dependiente, tanto en personas como en animales de laboratorio.

La anemia aplásica tiene una tasa de mortalidad muy elevada, del orden del 50% en personas afectadas.

El benceno posee asimismo efectos depresores sobre el sistema nervioso central, produciendo mareo, debilidad, euforia, náuseas y dolores de cabeza en exposiciones moderadas. Al aumentar la dosis, los efectos sobre el sistema nervioso central son visión borrosa, temblores, respiración rápida y entrecortada, parálisis, inconsciencia e incluso la muerte.

El benceno está clasificado como agente cancerígeno del grupo 1 por la IARC (*International Agency for Research in Cancer*), es decir, es cancerígeno para personas, y se considera que la evidencia es suficiente, tanto en estudios realizados en personas como en animales de laboratorio.

1.3.3. Tolueno

Es un compuesto volátil (presión de vapor a 20C de 3.8KPa), por lo que su evaporación es el principal mecanismo de distribución en el medio ambiente. Se volatiliza fácilmente desde la superficie de suelos y aguas. "El tiempo de vida media de su volatilización desde ríos y lagos se ha estimado en 1 hora y 4 días respectivamente" [8] Su solubilidad en agua es de 526mg/L a 25C.

Reacciona en el aire con radicales hidroxilo, con un tiempo de vida media de 3 días. La biotransformación en el medio ambiente se produce con rapidez, tanto en la superficie del suelo como en aguas. En suelos superficiales, su tiempo de vida media por biodegradación se ha calculado en varios estudios, estimándose en el rango de varias horas a 71 días. "En aguas, la velocidad de degradación del tolueno depende de las condiciones de oxigenación del medio. En condiciones aerobias, el tiempo de vida media es de 4 días, mientras que en

condiciones anaerobias es de 56 días. La hidrólisis no constituye una vía de transformación ambiental importante para este compuesto." [8]

El tolueno posee una movilidad alta en suelos y no tiende a adsorberse a la fracción sólida de suelos y sedimentos.

El tolueno presenta un buen grado de absorción por inhalación e ingestión. Tras su absorción, se distribuye preferentemente al sistema nervioso central, dado su alto grado de irrigación sanguínea y contenido en lípidos.

Además del sistema nervioso central, el tolueno se distribuye a otros tejidos en función de su contenido lipídico, y alcanza su máxima concentración en el tejido adiposo. El metabolismo del tolueno tiene lugar en el hígado, por oxidación catalizada por el sistema enzimático del citocromo P-450.

1.3.3.1. Aplicaciones

El tolueno se utiliza extensamente como disolvente en pinturas, lacas, colas, como agente de limpieza y en la industria química, como intermedio en la fabricación de compuestos orgánicos, como "el ácido benzoico, benzaldehido, benceno y uretano, así como explosivos y tintas." [8]

También se han detectado emisiones de tolueno en fuentes naturales, como volcanes e incendios forestales. "El tolueno es un contaminante ubicuo de suelos, aguas superficiales y subterráneas" [8]

1.3.3.2. Toxicidad

Los efectos tóxicos del tolueno se producen fundamentalmente por depresión del sistema nervioso central.

“La exposición aguda provoca inicialmente excitación, seguida de depresión con fatiga, ataxia, convulsiones y anestesia general, e incluso la muerte por hipoxia arritmia y parada cardíaca”. [8]

La inhalación crónica provoca debilidad muscular, síndrome gastrointestinal con dolores, náuseas y vómitos, insuficiencia hepatorenal y síndrome neuropsiquiátrico. La intoxicación crónica suele presentarse asociada al abuso intencionado por inhalación de este compuesto, “aunque también se han descrito efectos más leves que los anteriores en personas expuestas en el medio laboral, en las que se han observado efectos subclínicos consistentes en alteraciones auditivas y visuales.” [8]

El tolueno presenta interacciones metabólicas importantes con otros compuestos biotransformados por los mismos sistemas enzimáticos, como el benceno. Axial, “la exposición conjunta a benceno y tolueno causa la inhibición metabólica competitiva de la isozima del citocromo P-450 responsable de la oxidación de ambos compuestos, por lo que se observa una disminución de los efectos tóxicos del benceno sobre el sistema hematopoyético.” [8]

El tolueno se encuentra en el grupo 3A de la IARC, no clasificable respecto a sus efectos cancerígenos en personas. Esta categoría se ha asignado atendiendo a la evidencia inadecuada en personas y a la evidencia de ausencia de efectos cancerígenos en animales de laboratorio.

1.3.4. Cumeno

El cumeno es un líquido inflamable, incoloro, con un olor penetrante a gasolina. Es insoluble en el agua. El cumeno se encuentra naturalmente en el crudo y es parte de la gasolina de alto octanaje. El cumeno es vertido al ambiente por refinerías de petróleo y por la combustión de los productos de éste. La volatilización del cumeno es importante y se emitirá al aire al evaporarse de productos que lo contienen.

En el aire la mayor parte de los vapores del cumeno reaccionan fotoquímicamente descomponiéndose y mezclándose con otros compuestos.

En el agua el cumeno tiende a volatilizar y/o biodegradarse rápidamente. En el suelo el cumeno también se volatiliza, y tiende a adsorberse fuertemente a las partículas, por lo que es poco probable que alcance los niveles freáticos.

1.3.4.1. Aplicaciones

Es usado como disolvente de pinturas y lacas y también es utilizado en la manufactura de otros químicos comúnmente encontrados en productos de limpieza.

1.3.4.2. Toxicidad

La ruta de absorción más importante es la inhalación de aire contaminado con cumeno. Niveles altos de exposición pueden ocasionar dolores de cabeza, mareos, somnolencia y problemas de coordinación motora. La exposición a niveles extremadamente altos podría resultar en la pérdida del conocimiento. El contacto prolongado con la piel produce dermatitis. La

exposición crónica al cumeno produce cambios en la química enzimática del hígado.

1.3.5. Estireno

Es un compuesto volátil (presión de vapor a 20C de 0.7KPa), por lo que la volatilización es su mecanismo predominante de emisión y distribución. Se evapora con rapidez desde la superficie de masa de agua, más lentamente desde suelos. "En estudios realizados con muestras de suelos contaminadas con estireno de 1.5 metros de profundidad, se necesitaron 31 días para que se evaporara el 26% del estireno inicialmente presente. En ensayos de laboratorio, el tiempo de vida media del estireno por evaporación a partir de muestras de agua de lago y agua destilada fue, respectivamente, de 1-3 horas y 6-7 horas." [8]

Reacciona en el aire con el radical hidroxilo, con un tiempo de vida media de 7 horas. La biodegradación es un proceso importante para la transformación del estireno en suelos en medio aerobio, "con reducciones medidas del 87-97% en 16 semanas. En estudios realizados en aguas de lago contaminadas se ha medido un 10-20% de biodegradación del estireno en un plazo de 3 semanas. La hidrólisis no constituye una vía de transformación ambiental importante para este compuesto." [8]

El estireno presenta una movilidad moderada en suelos y tiende a adsorberse a suelos y sedimentos. La absorción de estireno tiene lugar principalmente por inhalación. El estireno se distribuye de acuerdo con el contenido en lípidos de los distintos tejidos, alcanzando concentraciones máximas en el tejido adiposo.

El metabolismo del estireno tiene lugar principalmente en el hígado, aunque también participan de forma menos importante el riñón, el intestino y los pulmones.

1.3.5.1. Aplicaciones

El estireno, o vinilbenceno, es uno de los compuestos orgánicos de mayor producción, utilizado como base para la obtención de poliestireno, resinas, gomas y aislantes. también se encuentra en los gases emitidos en motores de combustión, las operaciones de incineración de residuos y el humo de tabaco.

1.3.5.2. Toxicidad

"En estudios realizados en animales se ha demostrado el efecto cancerígeno del estireno en el estómago de roedores a los que se administró estireno por vía oral. Los estudios realizados en animales expuestos por inhalación no han sido concluyentes, ni tampoco los estudios epidemiológicos realizados en trabajadores expuestos a mezclas de estireno y 1,3-butadieno, en los que el exceso de incidencia de cáncer respecto a controles se ha atribuido a la exposición al 1,3-butadieno." [8]

Sin embargo, se ha observado el efecto genotóxico del estireno en estudios realizado en cultivos de sangre humana, en los que el estireno provoca lesiones cromosómicas dosis-dependientes. también se ha identificado la presencia del óxido de estireno en sangre de trabajadores expuestos, así como un aumento significativo de lesiones cromosómicas en sangre de dichos trabajadores.

El estireno presenta efectos tóxicos sobre los sistemas nerviosos central y periférico, así como efectos irritantes sobre la piel, ojos, garganta y sistema respiratorio.

La exposición aguda a estireno produce irritación de ojos y garganta, aumento de la secreción mucosa nasal, gusto metálico en la boca, mareo y vértigo. Se ha observado la aparición de neuropatías periféricas en trabajadores expuestos de forma crónica. El estireno, por contacto prolongado con la piel, disuelve y elimina componentes lipídicos y provoca dermatitis.

El estireno se encuentra clasificado por la IARC en el grupo 2B de compuestos cancerígenos, posiblemente cancerígenos para el hombre, dada la existencia de evidencias inadecuadas en estudios en el hombre y evidencias limitadas en estudios en animales.

1.3.6. O-xileno

La distribución medioambiental de los xilenos es fundamentalmente la volatilización (presión de vapor a 20°C de 0.7KPa). Los xilenos son básicamente insolubles en agua. Se volatilizan con facilidad desde la superficie de suelos y aguas. "Los tiempo de vida media para la volatilización desde ríos y lagos son, respectivamente, de 3 y 99 horas." [8] Los xilenos reaccionan con los radicales hidroxilos generados por mecanismos fotoquímicos, con un tiempo de vida media en el aire de 1-2 días.

Su movilidad en suelos es moderada y depende de la composición de los mismos y del pH. En el medio acuático tienden a adsorberse moderadamente a los sedimentos.

La biodegradación medioambiental de los xilenos tiene lugar en medio aerobio (tiempo de vida media de 3.3 horas). La hidrólisis no constituye una vía de transformación ambiental relevante para los xilenos.

La principal ruta de absorción de los xilenos es la inhalación, aunque también se absorbe efectivamente por ingestión, como ha sucedido en distintos incidentes de ingestión accidental de estos compuestos. Como otros disolventes lipofílicos volátiles, se absorbe bien a través de la piel, pero mucho más lentamente que por vía inhalación. Se calcula que la vía cutánea representa únicamente un 1% del total absorbido de xilenos en el medio ocupacional.

No se han apreciado diferencias entre los tres isómeros en lo que representa a su velocidad o grado de absorción.

Los xilenos se distribuyen a través de la sangre por el organismo, concentrándose en los distintos tejidos en función de su contenido en lípidos. El metabolismo de los xilenos es rápido por lo que estos compuestos no tienden a acumularse en el organismo humano.

1.3.6.1. Aplicaciones

Los xilenos, o dimetilbencenos, se utilizan en grandes cantidades en múltiples aplicaciones, entre las que destaca su uso como disolvente y como componente de las gasolinas y combustible de aviación, formando parte del denominado BTEX (Benceno, tolueno, etilbenceno, xilenos).

“Otras importantes aplicaciones son la industria de la goma y caucho, y cada uno de los isómeros, como los ácidos ftálico, izo ftálico y terftálico, así

como el dimetilterftalato, todos ellos utilizados en la obtención de plastificantes y componentes de fibra y película de poliéster". [8]

Como disolvente, suele utilizarse una mezcla de los tres isómeros conocida con la denominación de tolueno técnico, constituido por 40% de m-xileno y 20% de cada uno de los otros dos isómeros y etilbenceno, con pequeñas cantidades de tolueno.

Los xilenos son contaminantes ubicuos, a cuya presencia medioambiental contribuyen como fuentes naturales las plantas y los incendios forestales.

1.3.6.2. Toxicidad

La exposición aguda a los xilenos produce depresión del sistema nervioso central, con mareos, náuseas, y dolores de cabeza a dosis bajas, y con confusión, depresión respiratoria y coma a dosis elevadas.

En concentraciones de 200 ppm en el aire, los xilenos poseen efectos irritantes, causando conjuntivitis, irritación nasal y de la garganta. A mayores concentraciones se comportan como potentes agentes irritantes del sistema respiratorio.

La exposición cutánea prolongada provoca dermatitis. También se han observado efectos tóxicos, aunque ligeros y transitorios, en el hígado y los riñones de personas expuestas accidentalmente a dosis elevadas de xilenos.

La exposición crónica en el medio ocupacional se ha asociado a la aparición de efectos permanentes en el sistema nervioso, los datos al respecto no son concluyentes.

No se han encontrado evidencias del comportamiento mutagénico o genotóxico de los xilenos. Los xilenos están clasificados en el grupo 3 por la IARC, esto es, no son clasificables respecto a su comportamiento cancerígeno, dada la existencia de evidencias inadecuadas, tanto en estudios con animales como en el hombre.

1.3.7. Ácido Sulfhídrico

El ácido sulfhídrico o sulfuro de hidrógeno es un gas incoloro, inflamable, con un olor característico a huevos podridos. Proviene de fuentes naturales como el crudo, el gas natural y emisiones volcánicas. También es producido por la descomposición bacteriana de materia orgánica, así como a partir de desechos humanos y animales. Las proteínas contienen aminoácidos sulfurados, los microorganismos poseen a su vez enzimas encargadas de desprender el átomo de azufre de estos aminoácidos, el cual es reducido con hidrógeno para formar el ácido sulfhídrico. Este proceso es conocido como fermentación proteica. Su formación es inhibida por la presencia de oxígeno en grandes cantidades por lo que suele formarse principalmente en procesos anaerobios. El ácido sulfhídrico también puede resultar de las actividades industriales como procesamiento de comida, hornos de coke, molinos de papel kraft y refinerías de petróleo.

Es un compuesto muy volátil, por lo que su principal vía de distribución medioambiental es la volatilización. Es emitido al ambiente en forma de gas y se difunde en el aire, permaneciendo en la atmósfera por aproximadamente 18

horas. Al interactuar con otros compuestos del aire sufre la transformación a dióxido de azufre y ácido sulfúrico. También en algunos casos puede ser vertido como desecho líquido por actividades industriales. Se puede evaporar fácilmente del agua dependiendo de las condiciones de temperatura y pH.

La vía de absorción más importante es la inhalación, individuos que viven cerca de plantas de tratamiento de aguas residuales pueden estar expuestos a niveles más altos del gas.

1.3.7.1. Aplicaciones

El ácido sulfhídrico principalmente es utilizado como un intermediario en la manufactura de ácido sulfúrico y de sulfuros inorgánicos, además de su uso como desinfectante en la agricultura. Este gas es también producto de algunos procesos industriales como en refinerías o en la producción de pulpa para papel.

1.3.7.2. Toxicidad

La exposición a bajas concentraciones puede ocasionar irritación en los ojos, nariz o garganta. También podría causar dificultades para respirar en personas asmáticas. Exposiciones cortas a concentraciones altas (mayores a 500 ppm) puede ocasionar pérdida del conocimiento y posiblemente la muerte. En la mayoría de los casos, la persona recupera normalmente el conocimiento sin efectos. Sin embargo, en muchos individuos, puede ocasionar efectos permanentes o de largo plazo como dolores de cabeza, pérdida de atención, poca memoria y empobrecimiento de las funciones motoras.

El umbral de olor para el ácido sulfhídrico depende del individuo, a concentraciones muy elevadas de 150 ppm ocurre una parálisis olfativa, haciéndolo muy peligroso pues inhalarlo en concentraciones de 500ppm o mayores puede ser fatal.

1.4. Niveles máximos de exposición laboral

1.4.1. Límites STEL y TWA de la Comisión Europea

La Unión Europea ha desarrollado un programa para la protección de los trabajadores para la exposición a sustancias peligrosas, con los siguientes objetivos:

- Prevenir o limitar la exposición de los trabajadores a sustancias peligrosas en lugares de trabajo;
- Proteger a los trabajadores que pudieran estar expuestos a estas sustancias

Para el cumplimiento de los objetivos es esencial el establecimiento de Límites de Exposición Ocupacional, los cuales surgen dentro del marco de las siguientes legislaciones Europeas:

- Directiva 98/24/CE, sobre la protección de la salud y la seguridad de los trabajadores contra los riesgos relacionados con los agentes químicos durante el trabajo.
- Directiva 2000/39/EC, sobre el establecimiento de una primera lista de Límites de Exposición Ocupacional (para 63 agentes).

La Unión Europea designó entonces a un comité para recomendar estos límites, el cual es conocido como SCOEL por sus siglas en inglés (*Scientific Committee on occupational Exposure Limits*), el cual basa sus propuestas en información científica actualizada, representando este el mayor reto para el comité.

Los límites recomendados por el comité se agrupan en dos categorías para cada sustancia y figuran dentro de las fichas internacionales de seguridad química de las sustancias químicas evaluadas, que son conocidos por sus siglas en inglés:

- TWA-8h (*Eight hour time weighted average*), utilizado para evaluar exposiciones diarias referidas a periodos de 8 horas de la jornada laboral, cuyo valor de concentración no presenta un riesgo para el trabajador al estar expuesto a valores menores durante toda su vida laboral.
- STEL (*Short term exposure limits*), valor relacionado con las exposiciones a altas concentraciones en periodos cortos de tiempo y que provocan especialmente efectos agudos sobre los trabajadores.

El comité proporciona límites basados en el análisis de los riesgos que representa una sustancia a la salud del trabajador, y que puedan ser recomendados cuando la información científica disponible sugiera que un valor umbral pueda ser identificado claramente para los efectos de la sustancia en cuestión.

Para algunos de los efectos adversos analizados como el carácter cancerígeno, la sensibilización respiratoria o los efectos genotóxicos se hace

imposible definir límites basados en los conocimientos científicos actuales, en estos casos el comité recomienda límites establecidos a niveles que acarreen un muy bajo riesgo.

Los límites de exposición profesional pueden aplicarse tanto a los productos comercializados como a los residuos y subproductos de los procesos de producción. Establecen límites de protección contra los efectos adversos sobre la salud, pero no abordan las cuestiones de seguridad, como las concentraciones inflamables. En el caso de las depuradoras de aguas residuales las emisiones de COVs se pueden considerar como subproductos de la cadena de procesos y operaciones unitarias involucradas en el tratamiento.

1.4.2. Límites VLA-ED y VLAEC del Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo de España

Desde 1998 el Instituto Nacional de Seguridad e Higiene el Trabajo (INSHT) ha publicado una guía que incluye una lista de más de 500 Límites de Exposición Ocupacional e instrucciones para el uso y aplicación de estos valores. Estos valores son desarrollados por un grupo de la Comisión Nacional de Seguridad y Salud en el Trabajo, cuyo esfuerzo se basa en la legislación Española acerca de la prevención de los riesgos en lugares de trabajo desde noviembre de 1995 y en el Decreto 39/1997. Los límites de exposición profesional para agentes químicos en España se publican en español en el Internet y en papel y son actualizados cada año por el INSHT.

El INSHT define dos diferentes tipos de valores límite umbral para las sustancias químicas:

- VLA-ED (Valor Límite Ambiental de Exposición Diaria) es el valor de referencia para la exposición diaria y "representan condiciones a las cuales se cree, basándose en conocimientos actuales, que la mayoría de los trabajadores pueden estar expuestos ocho horas diarias y 40 horas semanales durante toda su vida laboral, sin sufrir efectos adversos para la salud." [12]
- VLA-EC (Valor Límite Ambiental Exposición de Corta Duración) es el valor de referencia para la exposición de corta duración."Este valor no debe de ser superado durante ninguna exposición de corta duración a lo largo de la jornada laboral. Los agentes químicos que tienen efectos adversos principalmente agudos, como por ejemplo, gases irritantes consideran la valoración VLA-EC como la más importante." [12]

1.4.3. Límites para los gases medidos en la EDAR de Padul

En la siguiente tabla VII se presentan los límites de exposición a ser analizados en el presente trabajo, tanto los propuestos por la Comisión Europea como los propuestos por el Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo.

Tabla VII. Límites de Exposición Profesional C.E. e INSHT

	COMISIÓN EUROPEA		INSHT	
	STEL	TWA	VLA-ED	VLA-EC
	[ppm]	[ppm]	[ppm]	[ppm]
Acido Sulfhídrico	15	10	10	15
Benceno	2.5	0.5	1	No hay
Tolueno	100	50	50	100
Estireno	100	50	20	40
Cumeno	No hay	50	20	50
O-xileno	150	100	50	100

Fuente: Comisión Europea e INSHT, 2011.

Resulta muy importante para realizar un correcto análisis de las concentraciones encontradas contar con algunos datos característicos de estos compuestos, como los presentados en la tabla VIII.

Tabla VIII. Características Físicas y Químicas de los gases en la EDAR

	PV [Kpa]	Solubilidad a 25°C	Peso Molecular	Pto. Ebullición a [°C]
Acido Sulfhídrico	1740	0.5g/100ml	34.1	80
Benceno	10	0.18g/100ml	78.1	80
Tolueno	3.8	No soluble	92.1	111
Estireno	0.7	0.03g/100ml	104.1	145
Cumeno	0.427	No soluble	120.2	152
O-xileno	0.7	No soluble	106.2	144

Fuente: Extracción de Fichas Internacionales de Seguridad Química de la Comisión Europea

De la tabla VIII cabe resaltar que el ácido sulfhídrico y el benceno son clasificados como *VVOC (Very Volatile Organic Compounds)*, siendo sustancias muy volátiles, mientras que el resto de sustancias caben dentro de la clasificación de *VOC (Volatile Organic Compounds)* o compuestos orgánicos volátiles presentada en la tabla V de la OMS basada en los puntos de ebullición de los compuestos, presentando el siguiente orden de volatilidad: H_2S >>Benceno>Tolueno>O-xileno>Estireno>Cumeno.

Mientras que tomando como referencia la Tabla 6 de la clasificación de la EPA basada en la presión de vapor se puede establecer que todas las sustancias elegidas para la medición en la EDAR entran en la clasificación de volátiles, pues su presión de vapor es superior a 0.13 KPa en todos los casos, y presentando el siguiente orden de volatilidad: Ácido Sulfhídrico>>Benceno>Tolueno>O-Xileno, Estireno>Cumeno.

1.5. Detector de Fotoionización

Los COVs pueden ser clasificados de acuerdo a sus características químicas (alcanos, hidrocarburos aromáticos, aldehídos, etc.), por sus propiedades físicas (punto de ebullición, presión de vapor, número de carbonos, peso molecular, etc.) o por sus efectos a la salud (irritantes, neurotóxicos, cancerígenos, etc.).

Para estimar su concentración en una mezcla de aire contaminado existen varios métodos por los cuales se puede obtener un valor de concentración de un COV específico o de la concentración total de varios COVs contenidos en el aire. Uno de estos métodos utiliza instrumentos de lectura directa para medir las concentraciones requiriendo poco trabajo, pero como cualquier método, presentando algunas ventajas y desventajas.

Entre los instrumentos de lectura directa se encuentran los denominados FID, que son detectores de ionización por llama y los PID que son detectores de fotoionización. El detector PID ioniza los COVs con radiación UV. La energía de la lámpara de UV es suficiente para ionizar la mayoría de los COVs, pero no todos. Algunos compuestos clorados no pueden ser fácilmente ionizados. Para los COVs el sensor PID es más sensible que el FID en casi un orden de magnitud. Los sensores de lectura directa son en general fáciles de usar, son portátiles y proveen una señal en tiempo real que hace posible detectar cambios de concentración en pequeños intervalos de tiempo.

El medidor utilizado para la toma de datos en la EDAR de Padul fue del tipo PID (*Photoionization Detector*) comercializado por *RAE Systems*, modelo *MiniRAE 3000*. Es un instrumento compacto diseñado como un monitor de amplio espectro para gases COV y un registrador de datos destinado al trabajo

en ambientes peligrosos. Percibe los COVs mediante un detector de fotoionización con una lámpara de descarga de gas de 9.3eV, 10.6eV o 11.7eV. [14] Actualmente es considerado como uno de los monitores portátiles de COVs más avanzados, pues su rango de detección de 0 a 15,000 ppm lo hace ideal para aplicaciones de higiene y seguridad industrial y laboral, y equipos de materiales peligrosos, proporcionando mediciones en tiempo real y la activación de señales de alarma al sobrepasar los límites preajustados.

El instrumento utiliza una bomba de muestreo integrada del tipo diafragma y trabaja con un caudal de 450 a 550cc por minuto. Puede introducir muestras de gas desde hasta 61 metros de distancia horizontal o 27.5 metros verticalmente, con velocidades de flujo de aproximadamente 0.9 metros por segundo.

El detector es capaz de almacenar la concentración de gas medida al final de cada período de muestreo y luego la descarga de estos datos a un ordenador se hace conectando la unidad por medio de su base de carga. También puede transmitir datos inalámbricamente con un módem propio, que al estar activado se puede controlar y desplegar las lecturas de forma simultánea para un máximo de 64 detectores remotos en un ordenador.

Utiliza un filtro externo que incrementa la vida del sensor PID al protegerlo de la entrada de partículas que lo puedan dañar. El filtro esta hecho de una membrana PTFE (teflón) con un tamaño de poro de 0.45 micras.

Tabla IX . Especificaciones del detector MiniRAE 3000

Tamaño	25.5 cm X 7.6 cm X 6.4cm
Peso	738g
Sensores	Sensor de fotoionización con lámparas estándar 10.6eV o 9.8eV o 11.7eV opcionales
Batería	<ul style="list-style-type: none"> • Paquete de batería recargable externa de Ion de litio sustituible en el sitio • Adaptador para baterías alcalinas
Horas de funcionamiento	16 horas de funcionamiento (12 horas con batería alcalina)
Pantalla grafica	4 líneas de 28X43 mm, con retroiluminación de LED para la mejor lectura de la pantalla
Teclado	1 tecla de funcionamiento y 2 teclas de programación, 1 luz de parpadeo encendido/apagado (on/off)
Alarmas	Avisador acústico de 95dB (a 30cm) y luz parpadeante roja de LED que indica que se ha n sobrepasado los límites prefijados
Registro de datos	6 meses estándar a intervalos de un minuto
Calibrado	Calibrado de dos o tres puntos para el cero y gas de referencia. Memoria de

	calibrado para 8 gases de calibrado, límites de alarma, valores de gas de referencia y fechas de calibrado
Bomba de muestreo	<ul style="list-style-type: none"> • Velocidad de flujo interno integrado a 500cc/min • Muestreo de 30 m horizontal y verticalmente
Alarma de flujo bajo	Apagado automático de la bomba en condición de flujo bajo
Temperatura	-20C a 50C
Humedad	0% a 95% de humedad relativa (sin condensación)

Fuente: RAE Systems, Medidor de COVs portátil MiniRAE 3000, especificaciones del producto, 2007.

El principio del funcionamiento se basa en la energía de ionización de cada compuesto, pues utiliza fotones de alta energía para romper las moléculas en forma de iones positivamente cargados. Cuando los COVs o algún gas llegan al detector estos son bombardeados por fotones de alta energía y son ionizados cuando las moléculas absorben luz ultravioleta. El gas adquiere entonces una carga eléctrica y los iones producen una corriente eléctrica, que es la señal de salida del detector. Cuanto mayor es la concentración del componente, más iones se producirán y la corriente eléctrica creada será mayor.

“En general, el detector puede medir cualquier compuesto con una energía de ionización inferior a la de los fotones de la lámpara”. [15] A continuación se presentan las energías de ionización de los compuestos

medidos en el EDAR de Padul, junto con sus factores de corrección para cada lámpara, así como los límites TWA preestablecidos para cada compuesto.

Tabla X. Energías de ionización y factores de corrección

	SINÓNIMO/ ABREVIATURA	NO. CAS	FÓRMULA	Lámparas			E.I. [eV]	TWA
				9.8 [eV]	10.6 [eV]	11.7 [eV]		
Acido Sulfhídrico	-----	778306 4	H ₂ S	S.R.	3.3	1.5	10.45	10
Benceno	-----	714 2	C ₆ H ₆	0.55	0.53	0.6	9.25	0.5
Tolueno	Metilbenceno	10888 3	C ₇ H ₈	0.54	0.5	0.51	8.82	50
Estireno	-----	100 425	C ₈ H ₈	0.45	0.4	0.4	8.43	20
Cumeno	Isopropilbence no	9888	C ₉ H ₁₂	0.58	0.54	0.4	8.73	50
O-xileno	1,2 dimetilbenceno	95 47 6	C ₈ H ₁₀	0.56	0.46	0.43	8.56	100

Fuente: Nota Técnica TN -106, RAE Systems.

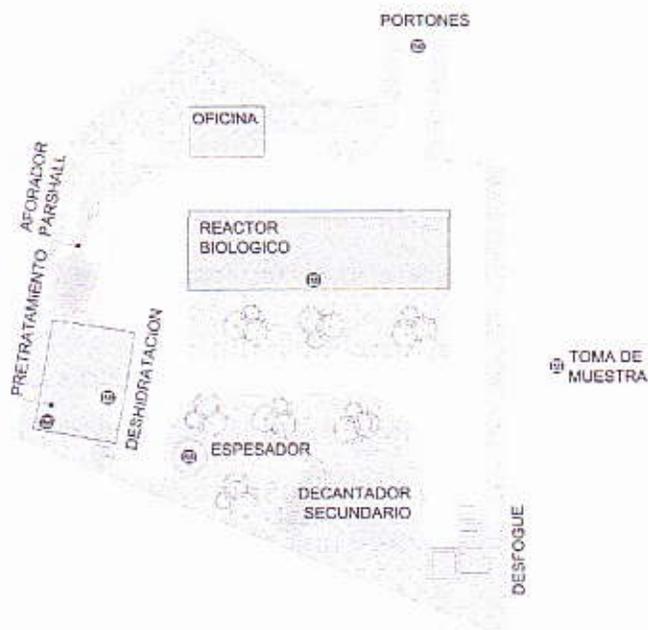
La lámpara utilizada para todas las mediciones fue la de 10.6eV, proporcionando una energía mayor a la energía de ionización de todos los compuestos analizados, por lo que los factores de corrección utilizados para el cálculo de las concentraciones son los presentados en la columna de la lámpara de 10.6eV. Ordenando en forma descendente los compuestos analizados según su energía de ionización se tiene el siguiente orden: Ácido Sulfhídrico > Benceno > Tolueno > Cumeno > O-xileno > Estireno.

2. METODOLOGÍA

El trabajo de campo para la medición de las concentraciones en el aire de COVs se llevo a cabo en las instalaciones de la estación depuradora de aguas residuales del Ayuntamiento de Padul, Granada.

La selección de los puntos de muestreo se hizo en base a los objetivos planteados, pues fueron considerados los sitios frecuentados por el operario de planta para las labores diarias de mantenimiento. En total fueron identificados siete puntos, estando dos de ellos al aire libre y los cinco restantes dentro del edificio que alberga el pretratamiento y la deshidratación de fangos. Estos puntos quedan ilustrados en los siguientes esquemas de la EDAR.

Figura 26. **Puntos de toma de muestra general**



Fuente: elaboración propia.

detallada en la deshidratación de fangos, pues se identificó en este punto altas concentraciones y oscilaciones variadas. Esta medición consistió en anotar en periodos de 10 minutos las concentraciones detectadas cada 10 segundos, para analizar el comportamiento en el tiempo de la concentración de los dos gases (ácido sulfhídrico y benceno) que sobrepasaron los límites de exposición considerados para el análisis.

- **Análisis gráfico comparativo**

Se realizó para cada gas considerado un análisis gráfico comparativo de las concentraciones medias, en partes por millón (ppm), de cada punto de toma de muestra con los límites establecidos por la Comisión Europea y los límites de exposición profesional para agentes químicos en España 2011, publicados por el Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el trabajo. [12]

- **Análisis estadístico comparativo**

El comportamiento oscilatorio y variado de las concentraciones detectadas en el cuarto de deshidratación para el benceno y ácido sulfhídrico hizo necesario proponer un análisis especial para este punto de muestreo, pues los rangos de valores obtenidos para estos dos compuestos se desviaban de la media considerablemente. Primero se realizó un análisis gráfico que permitiera observar la existencia o no de una correlación entre la oscilación diaria de las concentraciones. Este consistió en realizar observaciones de 10 minutos en el cuarto de deshidratación, anotando cada 10 segundos la concentración desplegada por el aparato. Una vez obtenida esta serie de datos para 4 diferentes días se procedió a graficar la concentración en función del tiempo (Figura 44 y 46). Esto proporcionó curvas de comportamiento que

seguidamente se graficaron en un solo eje de coordenadas para inferir acerca de su correlación (Figura 45 y 47).

En segundo lugar, se aplicó la técnica estadística del contraste de hipótesis para validar una hipótesis de partida consistente en la igualdad a priori de medias, asumiendo una distribución normal de las series de datos. El contraste de medias se hizo utilizando el estadístico de prueba z para inferir acerca de la igualdad o no de las medias de las series de datos diarias medidas en el proceso de deshidratación de fangos. Las series de datos diarias se compararon una a una utilizando la herramienta XLSTAT de análisis de datos y estadísticas para *Microsoft Excel*. De esta forma, la hipótesis a testar queda planteada de la siguiente forma:

Paso 1: planteamiento de las hipótesis nulas

Hipótesis nulas:

- Las concentraciones diarias de ácido sulfhídrico en el cuarto de deshidratación son iguales entre sí.
- Las concentraciones diarias de benceno en el cuarto de deshidratación son iguales entre sí.

Si se rechazara la hipótesis de igualdad de medias, se considerará válida la hipótesis alterna que significaría que las concentraciones diarias de ácido sulfhídrico, por un lado, y de benceno, por otro lado, son diferentes en el cuarto de deshidratación por lo que esta variabilidad no se debe a la aleatoriedad intrínseca del proceso de toma de datos sino que es causa del propio ciclo de trabajo de la centrífuga de deshidratación de fangos. Esto implica que un análisis exhaustivo para establecer un valor de la media de concentraciones no podría realizarse basándose en muestreos aleatorios simples sino que debería

realizarse medidas continuas y temporales diarias de las concentraciones en el lugar que se desee evaluar.

Paso 2: nivel de significancia

El nivel de significancia es la probabilidad de rechazar la hipótesis nula cuando esta es verdadera. El nivel de significancia escogido es del 5%.

Paso 3: estadístico de prueba

El estadístico de prueba es el valor de z y esta dado por

$$z = \frac{X - \mu}{\sigma / \sqrt{n}}$$

Donde X es la media de los datos observados, μ es la media de comparación, σ la desviación estándar y n el numero de muestras.

Paso 4: criterios de la prueba Z

Para aceptar la hipótesis nula de igualdad de medias el valor de z debe estar dentro del rango de valores críticos ($-1.96 < z < +1.96$), si el valor de z esta fuera del rango de valores críticos no se acepta la hipótesis de igualdad de medias. Esto quiere decir, que se deberían de realizar medidas continuas y temporales diarias de las concentraciones en los lugares donde se desee evaluar dentro de la EDAR.

3. RESULTADOS

Las medias aritméticas de las concentraciones registradas con el detector en cada punto de muestra se presentan en la tabla XI. Todos los límites de exposición analizados fueron rebasados en el tamiz de finos y en la deshidratación por el ácido sulfhídrico. La concentración de benceno también sobrepasó los límites TWA y VLA-ED en el punto de muestra de la deshidratación. Las concentraciones de cumeno, estireno, o-xileno y tolueno se mantuvieron muy por debajo de los límites máximos de exposición considerados, y es importante resaltar que presentaron los mayores niveles en la deshidratación y en el tamiz de finos.

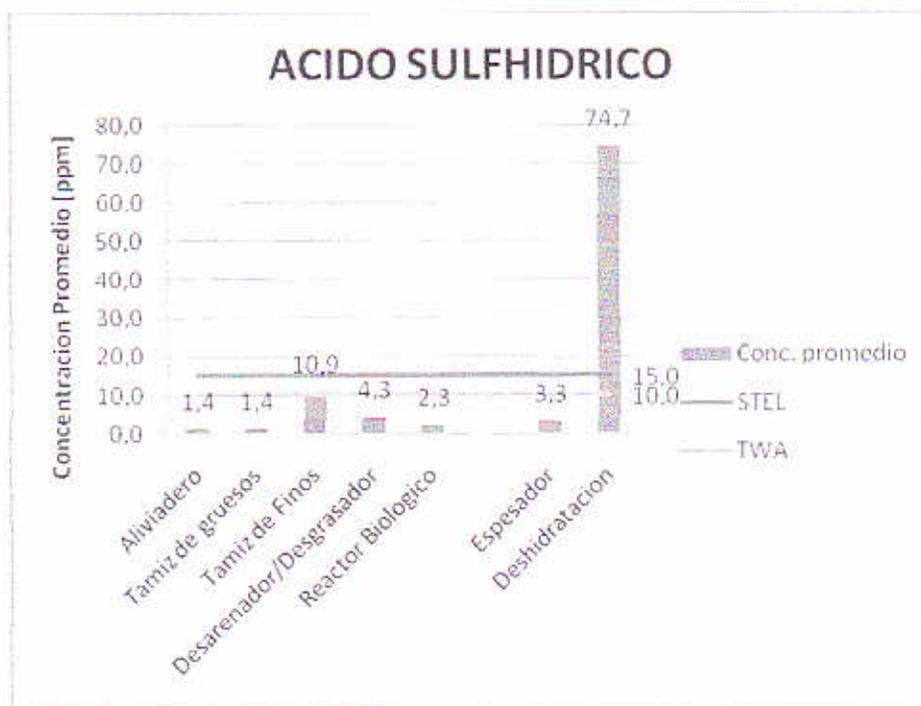
Tabla XI. Concentraciones promedio en ppm en los puntos de muestreo

LÍNEA DE AGUA						LÍNEA DE FANGOS	
	Aliviadero	Tamiz de gruesos	Tamiz de Finos	Desarena- dor/ Desgra- sador	Reactor Biológico	Espesador	Deshidra- ción
Ácido Sulfhídrico	1.4	1.4	10.9	4.3	2.3	3.3	74.7
Benceno	0.1	0.1	0.3	0.1	0.1	0.1	1.9
Cumeno	0.1	0.1	0.5	0.2	0.1	0.1	2.5
Tolueno	0.1	0.1	0.3	0.2	0.1	0.1	1.7
Estireno	0.05	0.1	0.3	0.1	0.04	0.04	1.1
O-xileno	0.1	0.1	0.4	0.1	0.04	0.1	1.6

Fuente: elaboración propia.

A continuación se presentan gráficos de cada compuesto en cuestión con la comparación para sus respectivos límites de exposición, primero para los límites STEL y TWA y luego para los límites VLA-ED y VLA-EC.

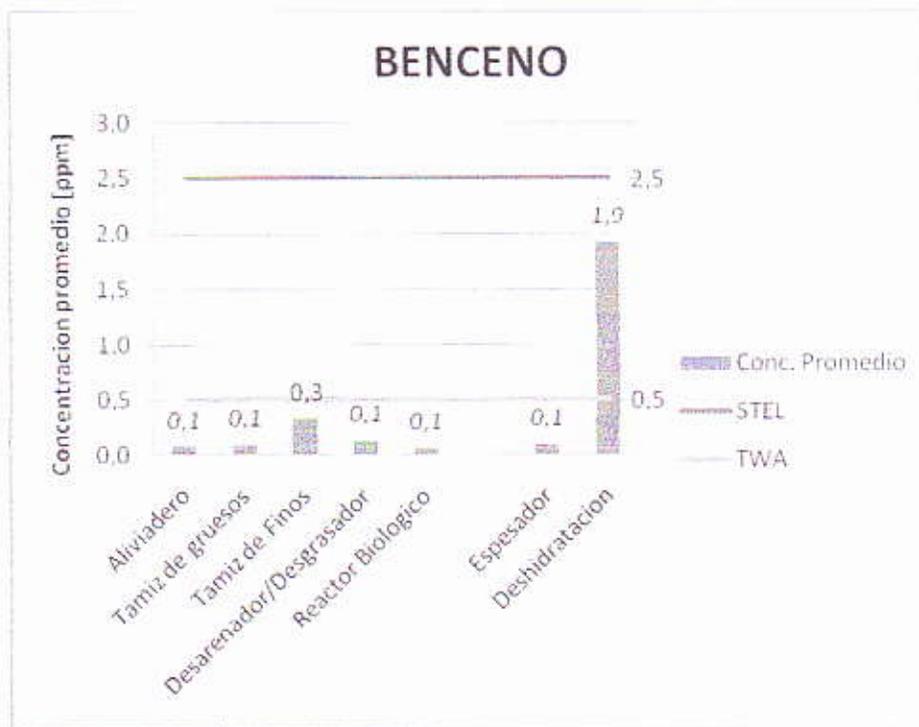
Figura 28. Comparación de concentración promedio de ácido sulfhídrico con límites STEL y TWA



Fuente: elaboración propia.

La concentración media de ácido sulfhídrico sobrepasó el límite TWA en el punto de muestreo del tamiz de finos en 0.9ppm. En el cuarto de deshidratación se presentaron los registros más críticos, rebasando ambos límites, STEL y TWA, en 64.7ppm y 59.7ppm respectivamente. En el resto de puntos de toma de muestra los niveles se mantuvieron por debajo de ambos límites.

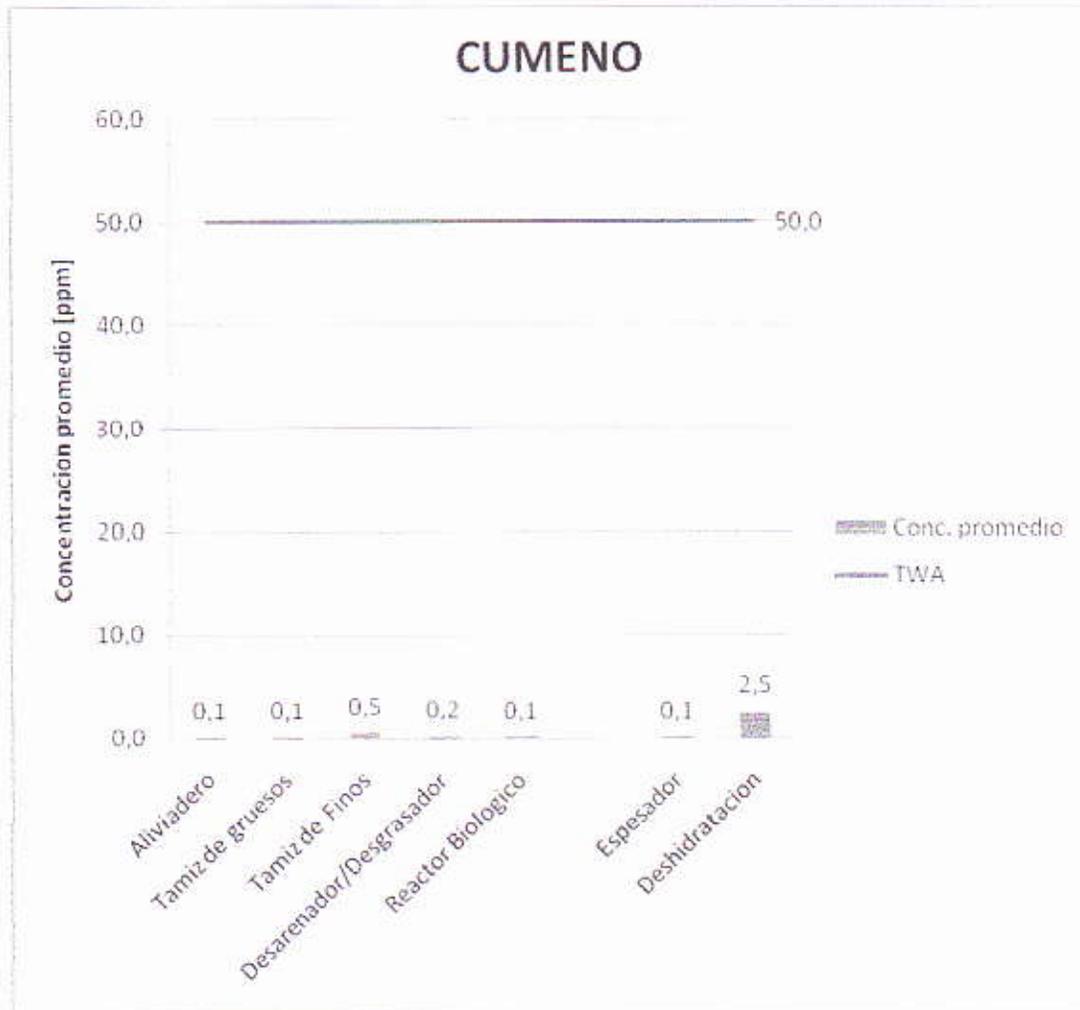
Figura 29. Comparación de concentración promedio de Benceno con límites STEL y TWA



Fuente: elaboracion propia.

Como se puede apreciar en la figura 29 la concentración de benceno en el cuarto de deshidratación sobrepasó el límite TWA en 1.4ppm, quedando 0.6ppm por debajo del límite STEL. El tamiz de finos representó el punto con la segunda concentración mas alta, quedando 0.2ppm por debajo de el límite TWA. Los demás puntos también quedaron debajo de ambos límites considerados.

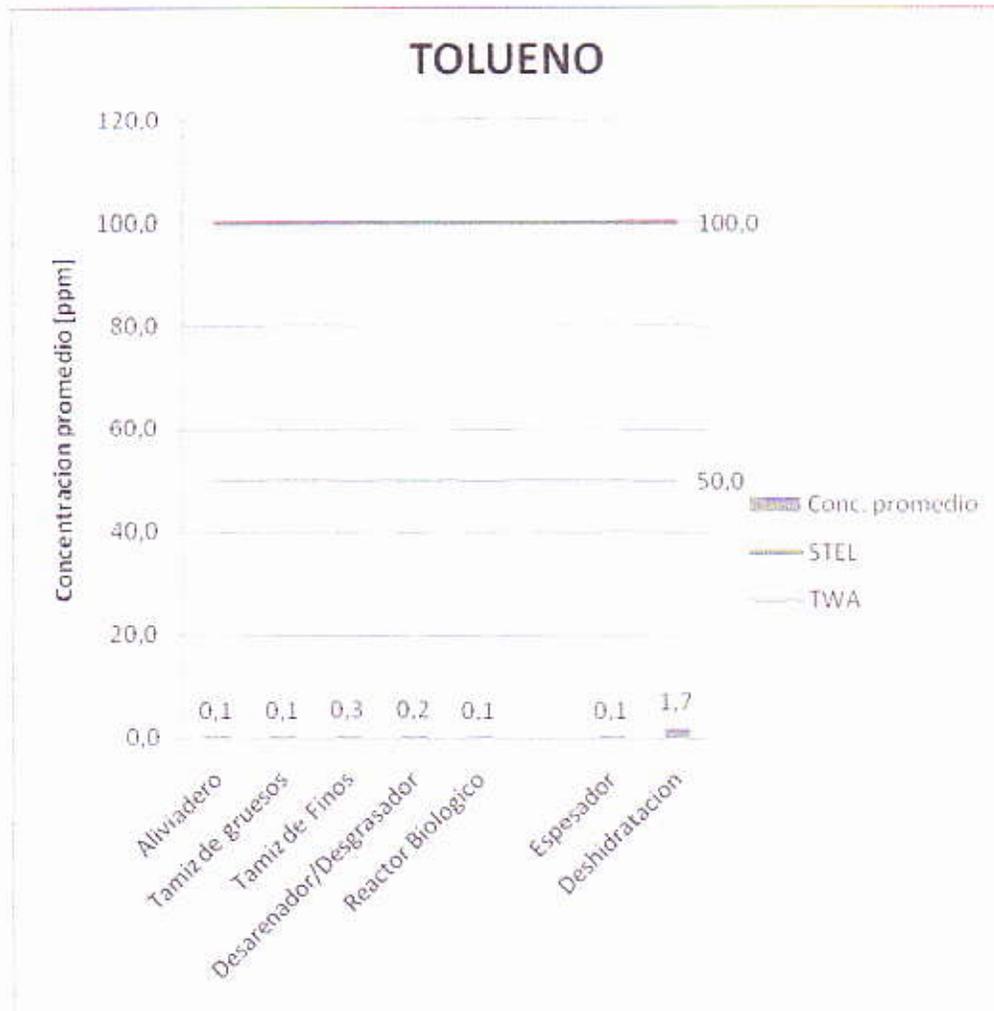
Figura 30. Comparación de concentración promedio de cumeno con límite TWA



Fuente: elaboración propia.

La figura 30 muestra las bajas concentraciones registradas de cumeno en los diferentes puntos de toma de muestra, presentando el valor más alto en la deshidratación y luego en el tamiz de finos, aunque muy por debajo del límite de exposición establecido por la Comisión Europea.

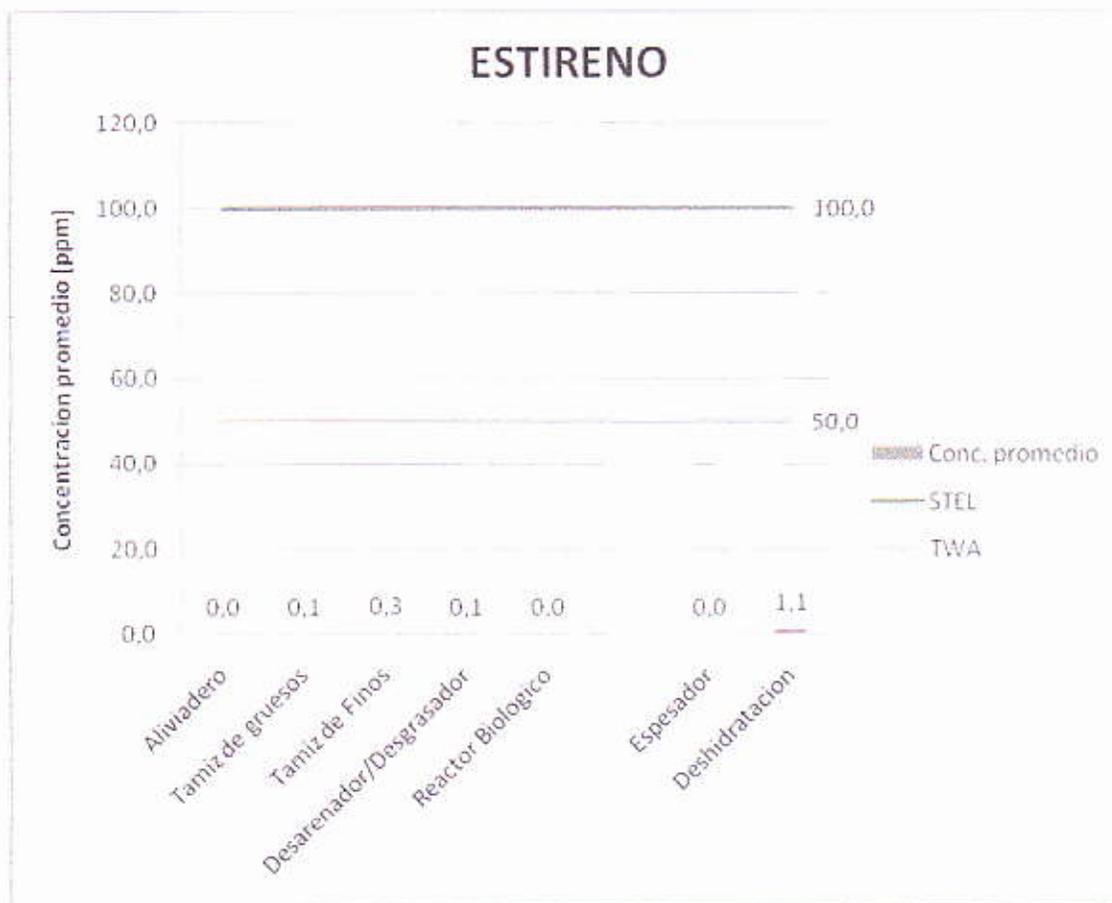
Figura 31. Comparación de concentración promedio de tolueno con límites STEL y TWA



Fuente: elaboración propia.

En la figura 31 para el tolueno se observa un comportamiento similar que para el cumeno, presentando valores muy por debajo de los límites STEL y TWA, pero alcanzando las concentraciones más altas en la deshidratación y en el tamiz de finos.

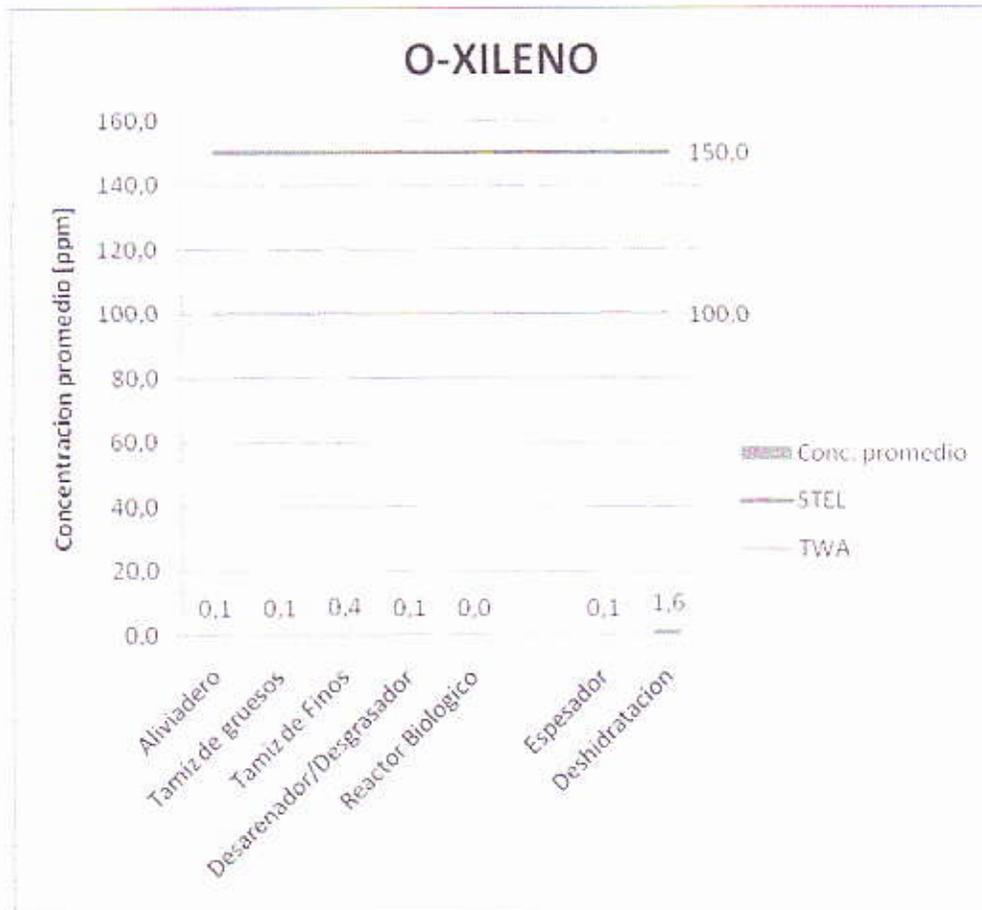
Figura 32. Comparación de concentración promedio de cumeno con límites STEL y TWA



Fuente: elaboración propia.

La concentración más elevada para el estireno se presentó en la deshidratación según se observa en la figura 32 y la segunda más alta en el tamiz de finos, aunque ambas considerablemente por debajo de los límites STEL y TWA.

Figura 33. Comparación de concentración promedio de o-xileno con límites STEL y TWA



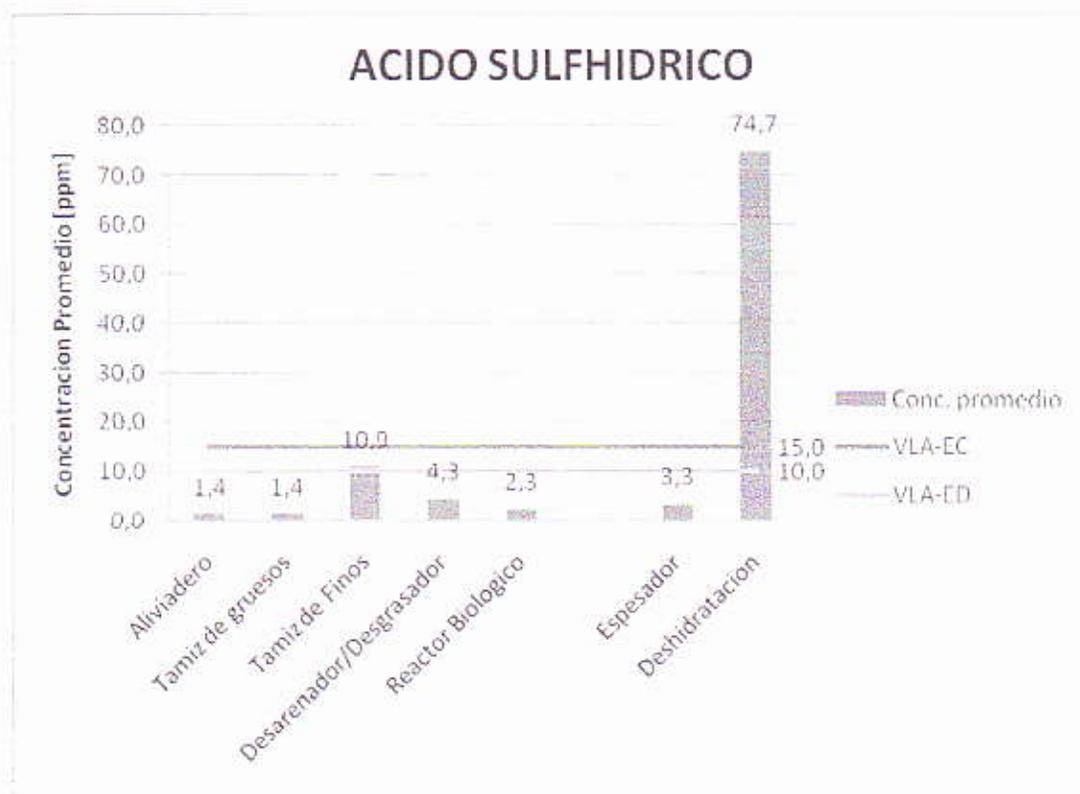
Fuente: elaboración propia.

En la figura 34 se observa que el o-xileno presenta el mismo comportamiento que el resto de COVs analizados, concentración más elevada en la deshidratación aunque con una diferencia proporcionalmente mayor que el resto de los que están por debajo de los límites STEL y TWA.

En los puntos donde se rebasaron los límites TWA o STEL, o ambos, la concentración media del ácido sulfhídrico en el tamiz de finos fue 1.09 veces

mayor que el límite TWA y por debajo del límite STEL; mientras que en la deshidratación la concentración de este compuesto fue 7.47 veces más elevada que el límite TWA y 4.98 veces el límite STEL. La concentración media detectada de benceno en la deshidratación de fangos alcanzó su nivel más alto por un factor de 3.8 veces el límite TWA.

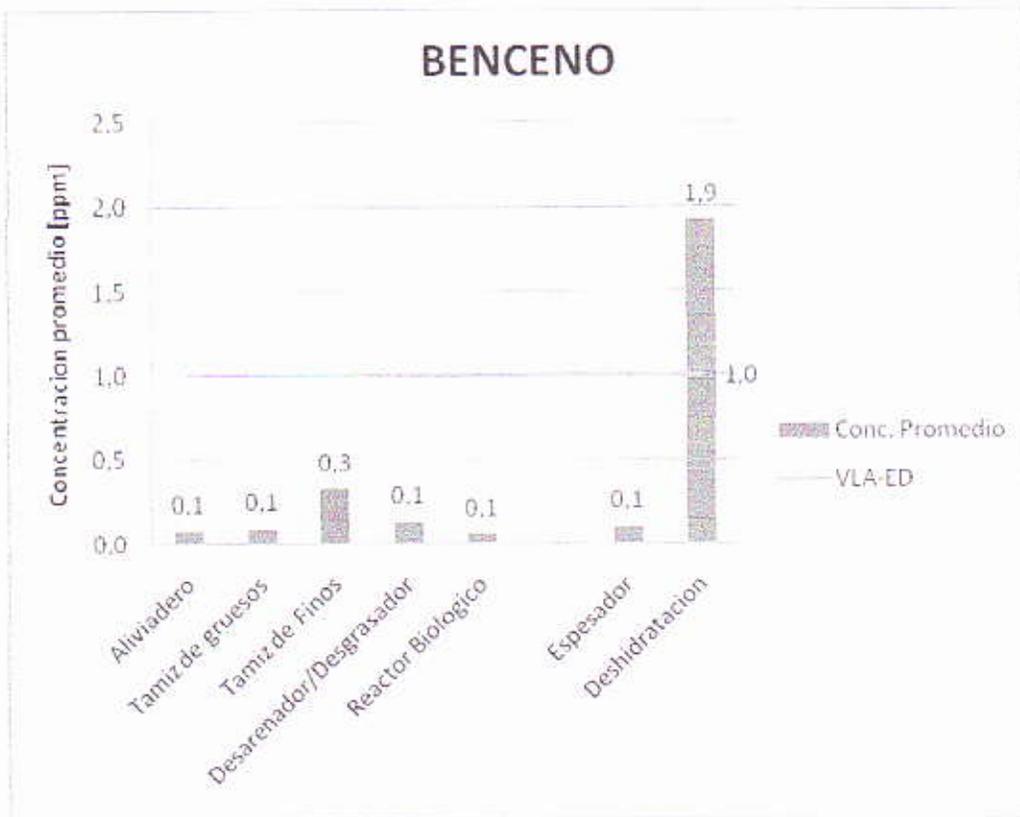
Figura 34. Comparación de concentración promedio de ácido sulfhídrico con límites VLA-EC y VLA-ED



Fuente: elaboración propia.

Los límites VLA-EC y VLA-ED son iguales en ambas normativas, por lo que el comportamiento de la concentración media del ácido sulfhídrico se puede interpretar de la misma manera que se explicó la figura 28.

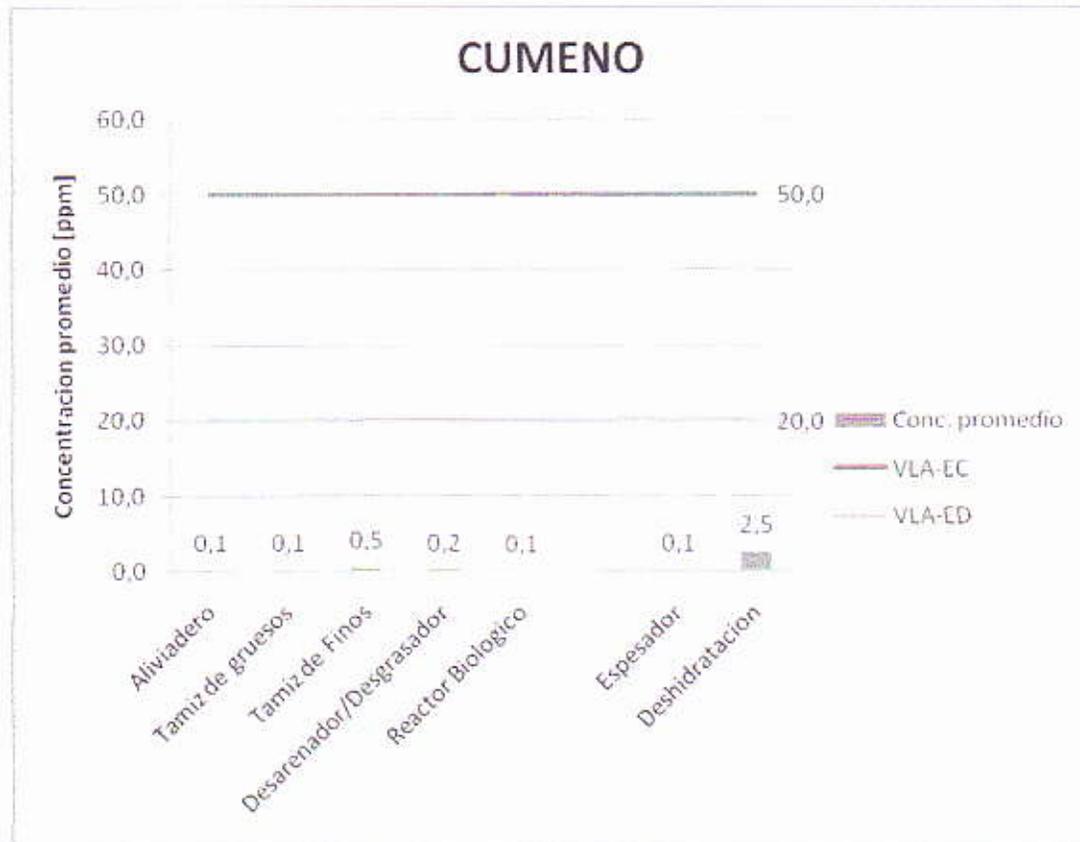
Figura 35. Comparación de concentración promedio de benceno con límites VLA-EC y VLA-ED



Fuente: elaboración propia.

El benceno superó el límite VLA-ED para concentraciones de exposición diaria en 0.9ppm, siendo 1.9 veces mayor que este límite.

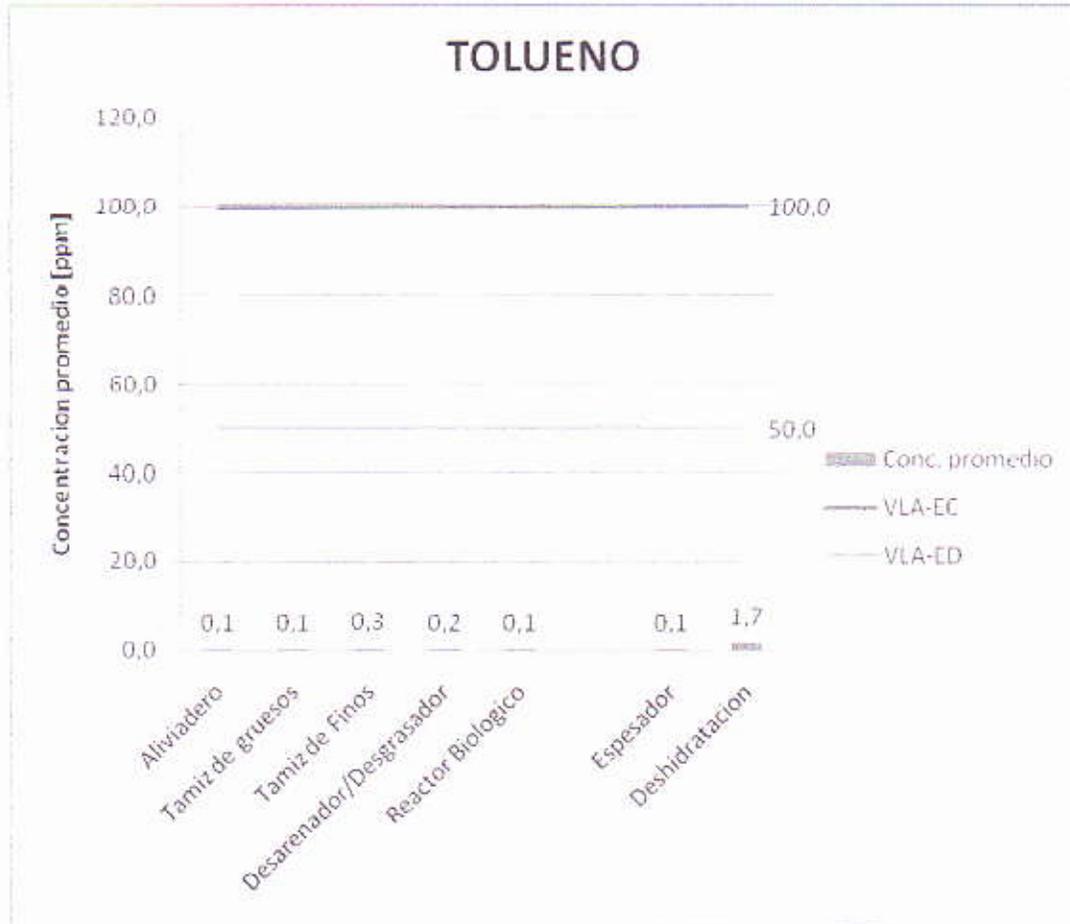
Figura 36. Comparación de concentración promedio de cumeno con límites VLA-EC y VLA-ED



Fuente: elaboración propia.

Los límites de exposición considerados en la figura 36 no fueron sobrepasados por la concentración media de cumeno registrada en el muestreo.

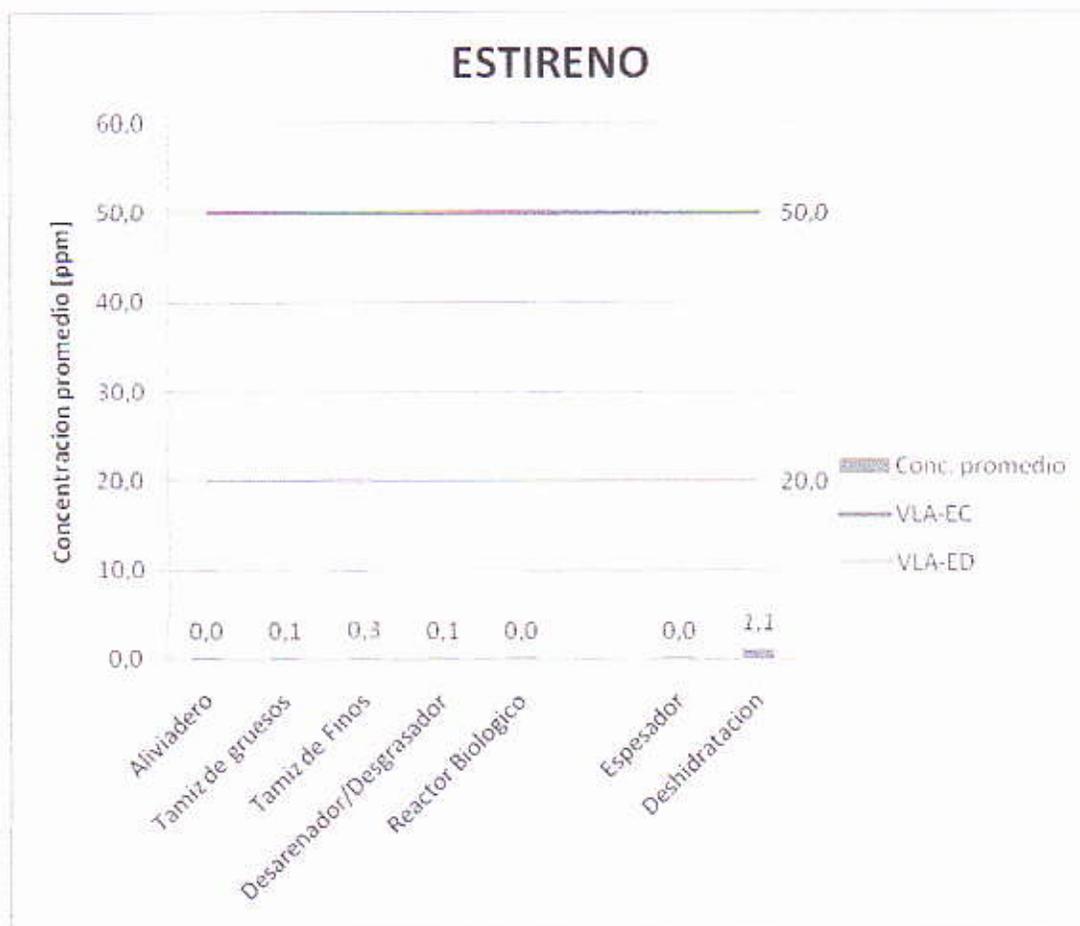
Figura 37. Comparación de concentración promedio de tolueno con límites VLA-EC y VLA-ED



Fuente: elaboración propia.

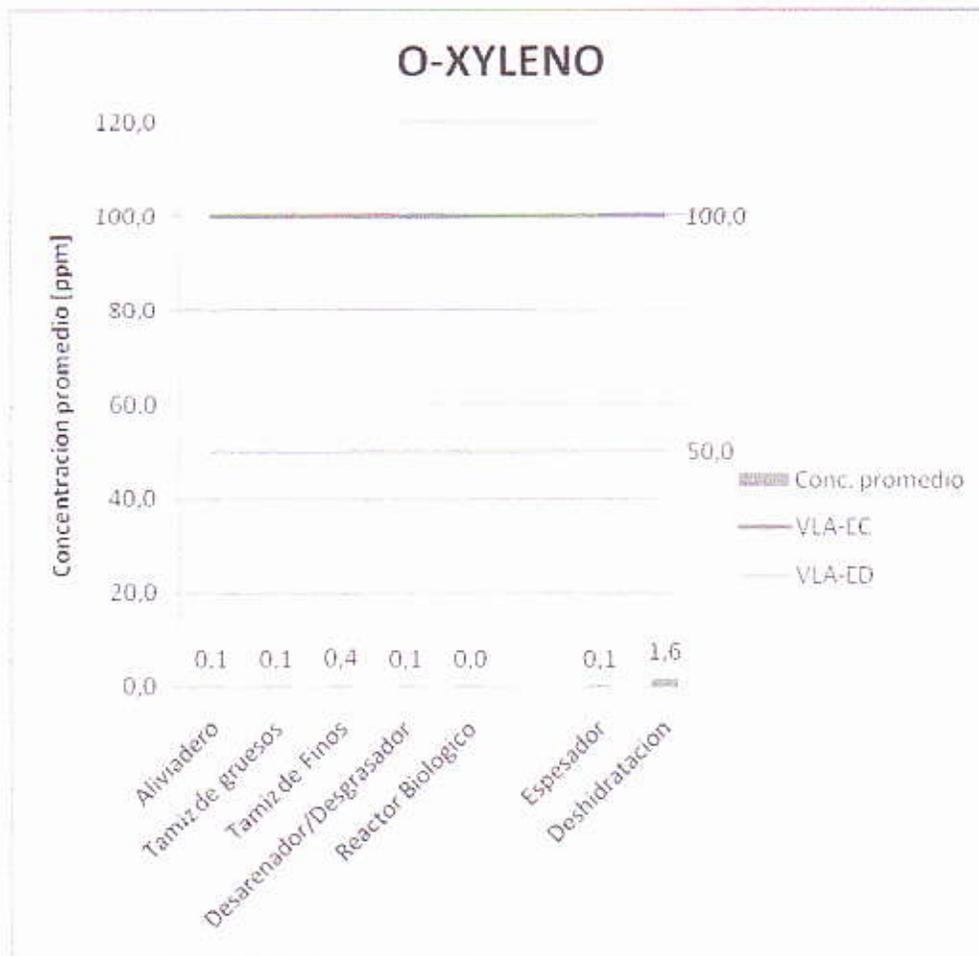
La concentración del tolueno en comparación con los límites del INSHT no fueron sobrepasados en ningún caso, y en todos quedaron muy por debajo de ellos.

Figura 38. Comparación de concentración promedio de ácido sulfhídrico con límites VLA-EC y VLA-ED



Fuente: elaboración propia.

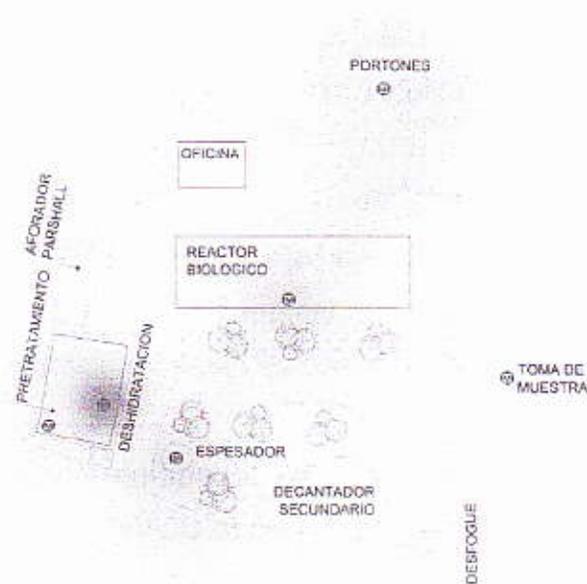
Figura 39. Comparación de concentración promedio de o-xileno con límites VLA-EC y VLA-ED



Fuente: elaboración propia.

La concentración media en el aire registrada de tolueno, estireno y o-xileno se mantuvo por debajo de los límites VLA-EC y VLA-ED en todos los puntos de muestreo.

Figura 40. Zonificación general de niveles de concentración de COVs en la EDAR de Padul



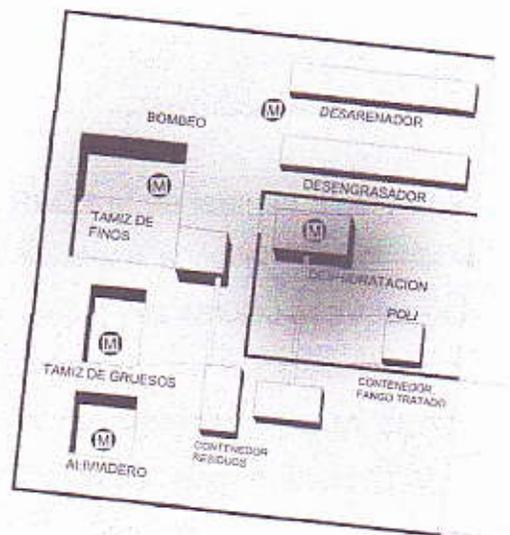
Fuente: elaboración propia.

La figura 40 muestra la planta general de la EDAR de Padul, donde se han identificado las zonas de mayor riesgo a exposición a concentraciones peligrosas de los COVs analizados con colores que pueden ser interpretados de manera intuitiva. El color rojo representa el área de mayor riesgo, siendo esta dentro del edificio que alberga el pretratamiento de al línea de agua y la deshidratación de fango de la línea de fangos. Los puntos de muestreo en el espesador y el reactor biológico presentaron niveles por debajo de los límites considerados en todos los casos, y se presentan en color anaranjado pues en el caso del benceno y el ácido sulfhídrico son considerables. El punto de muestreo en los portones de la EDAR se representa en color amarillo donde los niveles de concentración fueron menores.

La figura 41 muestra un esquema del interior del edificio donde de igual manera se representan las zonas de mayor riesgo a exposición con colores rojo, anaranjado y amarillo, de mayor a menor grado de concentración. El cuarto central del edificio que alberga la centrífuga utilizada para la deshidratación del fango es el lugar mas critico de toda la EDAR.

Seguidamente el area del tamiz de finos presenta una zona de riesgo a exposición indicada con color naranja, que de alguna manera se encuentra influenciada por las emisiones formadas dentro del cuarto de la centrífuga por la comunicación que existe entre el cuarto de deshidratación y esta zona.

Figura 41. Zonificación dentro del edificio de los niveles de concentración de COVs

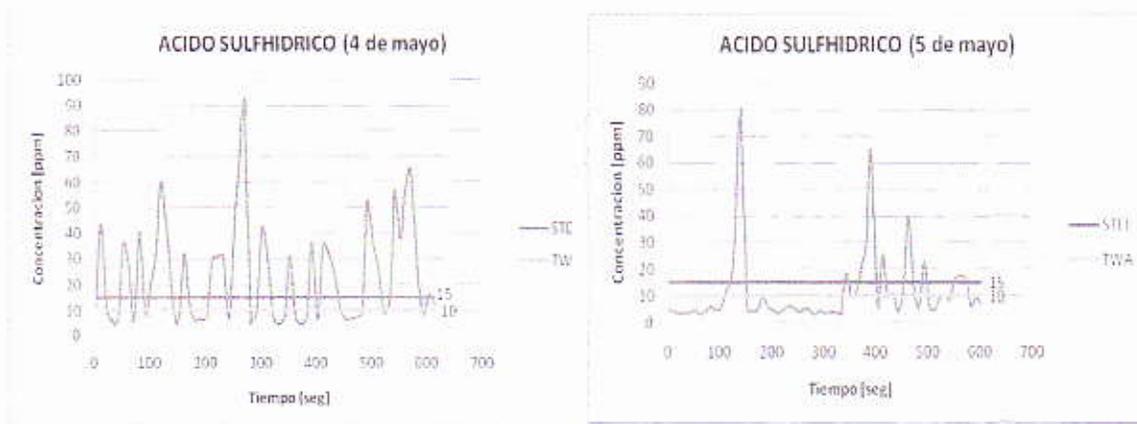


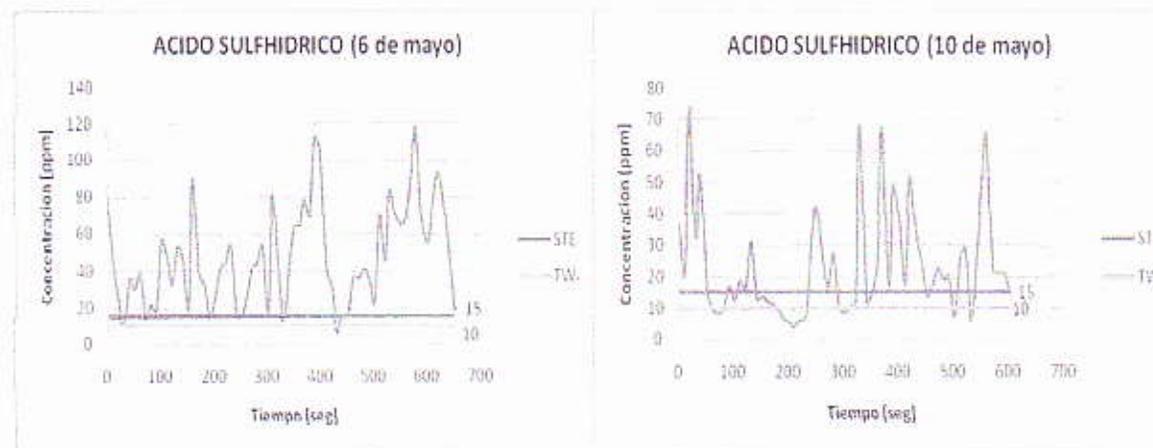
Fuente: elaboracion propia.

Análisis estadístico del cuarto de deshidratación de fangos

Una vez identificado el cuarto de deshidratación de fangos del edificio como la zona de más elevadas concentraciones y oscilación de niveles de concentración se realizaron cuatro mediciones específicas en cada día durante períodos de 10 minutos, anotando cada 10 segundos la lectura del aparato, con el fin de observar algún patrón de comportamiento de las concentraciones encontradas en esta fase de operación. La figura 42 muestra el comportamiento en el tiempo en cada uno de los días de medición, siendo esta oscilante y variable en períodos cortos de tiempo. La Figura 43 muestra que no existe una correlación en la oscilación de la concentración detectada durante los cuatro días de muestreo específicos en el cuarto de deshidratación para el ácido sulfhídrico.

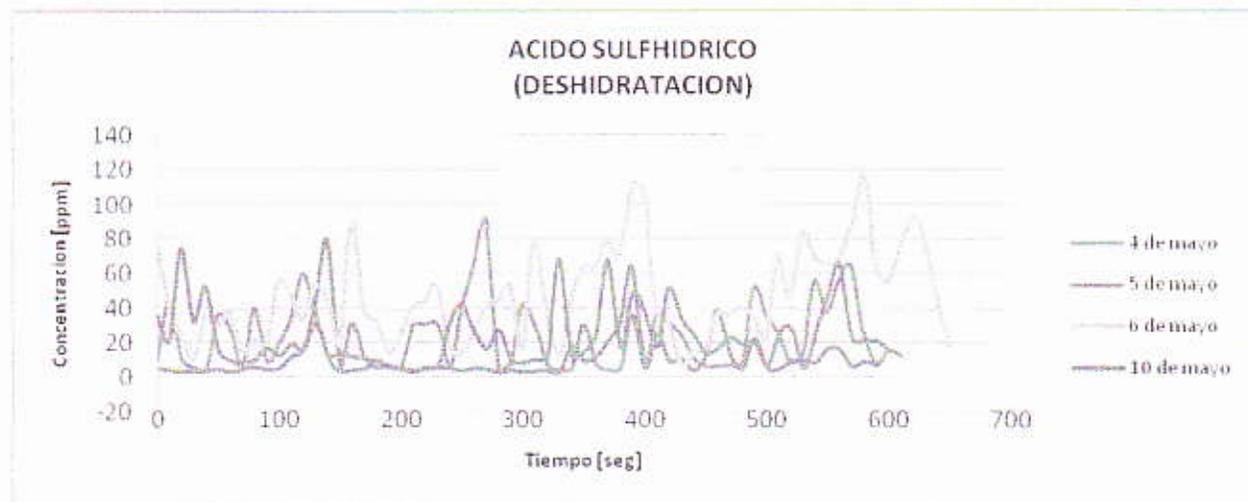
Figura 42. Oscilación de concentraciones de ácido sulfhídrico en el cuarto de deshidratación en períodos de 10 minutos





Fuente: elaboración propia.

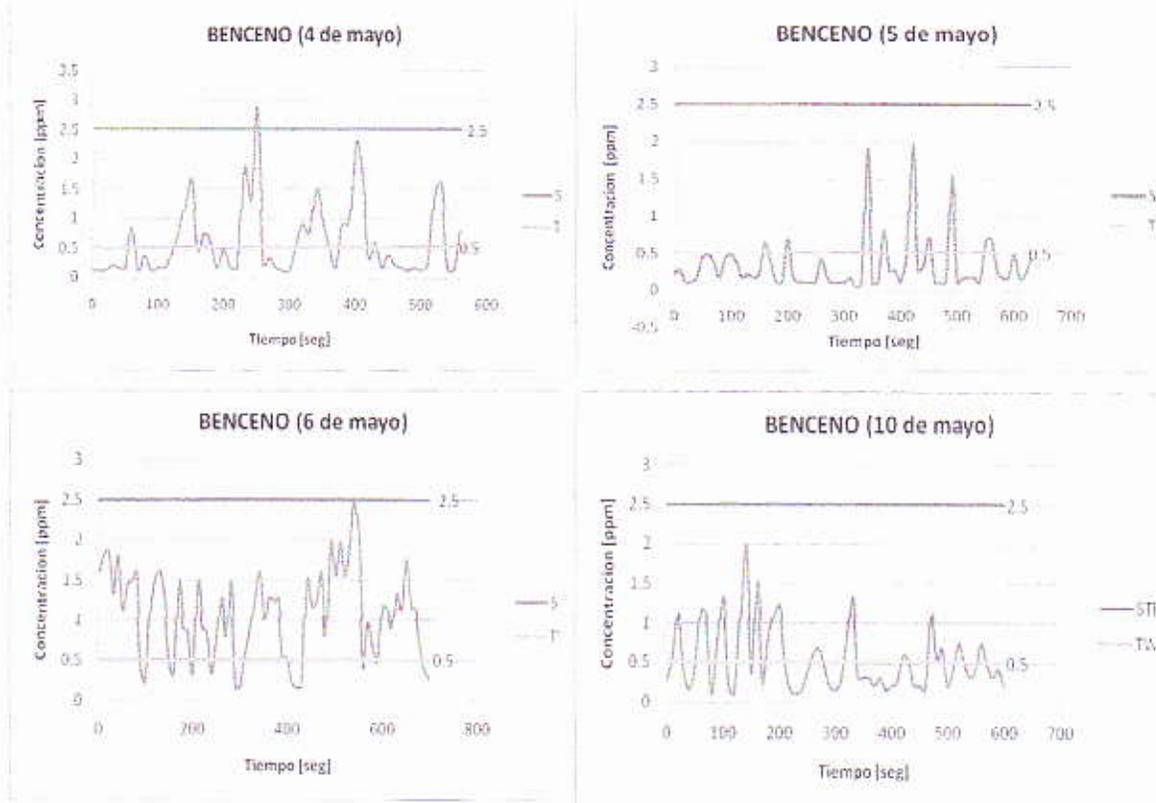
Figura 43. Concentraciones de ácido sulfhídrico en el tiempo



Fuente: elaboración propia.

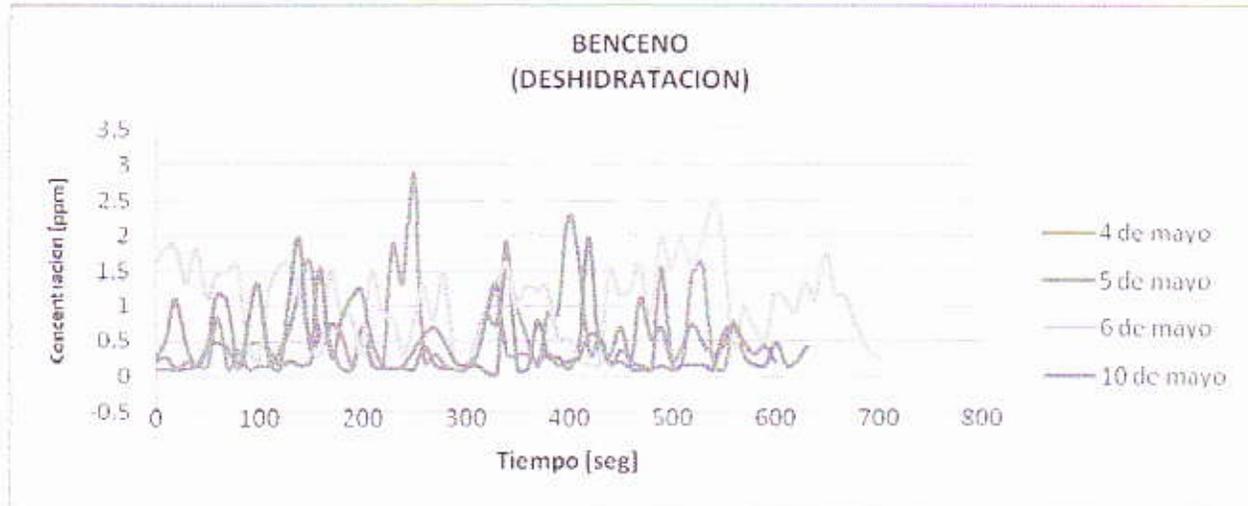
La figura 44 muestra el comportamiento diario de las concentraciones de benceno dentro del cuarto de deshidratación y en la Figura 45 se puede observar que no existe ninguna correlación en el comportamiento de la concentración para este compuesto durante los 4 días de muestreo especial.

Figura 44. Oscilación de concentraciones de benceno en el cuarto de deshidratación en periodos de 10 minutos



Fuente: elaboración propia.

Figura 45. Concentraciones de benceno en el tiempo



Fuente: elaboración propia.

3.1. Resultados del contraste de hipótesis de medias

Tabla XII. Medias diarias de concentración en el aire en el cuarto de deshidratación de fangos

DIA	MEDIAS DIARIAS [ppm]	
	ÁCIDO SULFHÍDRICO	BENCENO
1	23.8425	0.5932
2	11.4235	0.3347
3	45.4795	1.1121
4	23.4795	0.5486

Fuente: elaboración propia.

Tabla XIII. Aceptación o no de la hipótesis de igualdad de medias para el ácido sulfhídrico en la deshidratación

COMPARACIÓN DIARIA	VALOR DE Z	INTERPRETACIÓN
1-2	3,972	Rechazo de hipótesis de igualdad de medias
1-3	-5,092	Rechazo de hipótesis de igualdad de medias
1-4	0,108	Aceptación de hipótesis de igualdad de medias
2-3	-8,798	Rechazo de hipótesis de igualdad de medias
2-4	-4,213	Rechazo de hipótesis de igualdad de medias
3-4	5,420	Rechazo de hipótesis de igualdad de medias

Fuente: elaboración propia.

Tabla XIV. **Aceptación o no de la hipótesis de igualdad de medias para el benceno en la deshidratación**

COMPARACIÓN DIARIA	VALOR DE Z	INTERPRETACIÓN
1-2	2,639	Rechazo de hipótesis de igualdad de medias
1-3	-4,585	Rechazo de hipótesis de igualdad de medias
1-4	0,449	Aceptación de hipótesis de igualdad de medias
2-3	-8,277	Rechazo de hipótesis de igualdad de medias
2-4	-2,787	Rechazo de hipótesis de igualdad de medias
3-4	5,907	Rechazo de hipótesis de igualdad de medias

Fuente: elaboración propia.

4. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

La EDAR de Padul opera diariamente recibiendo un efluente con descargas de aguas residuales de origen doméstico, comercial e industrial. La composición de estas aguas es muy variada debido a la diversidad de establecimientos dentro del municipio, ocasionando emisiones de COVs en las instalaciones de la EDAR que llegan a concentrarse en el área de trabajo del operario de planta.

De los seis compuestos analizados se encontró que dos de ellos, el ácido sulfhídrico y el benceno, rebasaron los límites máximos de exposición (TWA, STEL, VAL-ED, VAL-EC), representando un riesgo para la salud de la persona expuesta en dos zonas específicas de las instalaciones, cuarto de deshidratación de fangos y el área del tamiz de finos del pretratamiento de la línea de agua.

La presencia de concentraciones mayores a los límites de exposición de estos dos compuestos debe ser analizada desde diversos puntos de vista para introducir medidas correctivas y reducir estos niveles. Los resultados de este trabajo son un primer acercamiento a la solución de esta problemática pues se identificaron las zonas de mayor incidencia de concentraciones que rebasaron los límites propuestos por las autoridades en el tema de exposición laboral. La emisión y permanencia de estos compuestos en las zonas de trabajo del operario de planta se pueden atribuir a las fuentes de COVs en aguas residuales, a los mecanismos de emisión de cada proceso, a los factores que afectan la emisión y concentración de cada compuesto estudiado a las

condiciones de operación de la planta y a las medidas de seguridad empleadas por parte del operario para reducir el nivel de exposición.

- Ácido sulfhídrico

De los 6 compuestos estudiados el ácido sulfhídrico presentó el mayor riesgo para la salud del operario de planta debido a los altos niveles de concentración registrados en el punto de toma de muestra del tamiz de finos y en el cuarto de deshidratación de fangos. La media registrada para este compuesto en el tamiz de finos fue de 10.9ppm y en el cuarto de deshidratación de 74.9ppm. Los límites establecidos por la Comisión Europea y por el INSHT de España son iguales en los dos casos, tanto para exposiciones diarias, como para exposiciones de corta duración, siendo estos de 15ppm y 10 ppm respectivamente.

La presencia de este compuesto en la EDAR se debe principalmente a su formación en la descomposición de la materia orgánica que alcanza la planta en la parte anaerobia del reactor biológico y en la región anaerobia del espesador de fangos. Su elevada presión de vapor lo hacen el compuesto con más probabilidades de ser emitido en cualquiera de los procesos de tratamiento, además de contar con una densidad mayor a la del aire que favorece su concentración en zonas poco ventiladas como el cuarto de deshidratación. La variabilidad en las concentraciones en el tiempo de este gas en el cuarto de deshidratación fueron analizadas de manera que se pudiera identificar un patrón de comportamiento, el cual no se encontró, por lo que se procedió entonces a comprobar por un método estadístico, y suponiendo una distribución normal de los datos, que las concentraciones diarias en el tiempo varían de manera aleatoria, descartando que sean correspondidas al proceso de deshidratación, sino más bien se justifican por la misma composición de las

aguas residuales que alcanzan la planta diariamente, las condiciones de ventilación y distribución de los procesos de tratamiento, y a las condiciones ambientales de temperatura y concentraciones de fondo de cada gas, por lo que los esfuerzos para reducir la exposición deben de enfocarse principalmente en manipular estas variables, especialmente la de ventilación y de medidas de seguridad dentro de la planta.

En ningún momento las concentraciones rebasaron los valores considerados mortales o de insensibilización del sentido del olfato.

En referencia a la metodología de muestreo de datos, el contraste estadístico de medias ha establecido que no se acepta la hipótesis de igualdad de medias, lo que nos permite determinar que para establecer un valor significativo de la media de la concentración de este gas en el proceso de deshidratación sería necesario realizar medidas de tipo continuo o al menos series temporales diarias más extensas que permita recoger la variabilidad intrínseca asociada a este proceso.

- Benceno

La concentración media de benceno (1.9ppm) en los diferentes puntos de muestreo de la EDAR de Padul superó los límites de exposición TWA (0.5ppm) y el límite VLA-ED (1ppm) en el cuarto de deshidratación de fangos. En los demás puntos se detectaron concentraciones por debajo de estos límites, además la media no superó el límite STEL propuesto por la Comisión Europea, mientras que el ISNHT no considera un límite VLA-CD para los agentes cancerígenos. Este compuesto es considerado como cancerígeno de categoría 1A por la IARC (*International Association of Research in Cancer*), además de ser un indicador de la presencia de COVs clasificados como

hidrocarburos aromáticos. El benceno por su presión de vapor elevada tiende a ser muy volátil, especialmente cuando se ve favorecido por los mecanismos de liberación de COVs en una EDAR. El control de las emisiones y de la concentración de benceno en las atmósferas de trabajo es de suma importancia debido a que se conoce según estudios que la exposición a concentraciones de 1 a 5ppm se aumenta el riesgo a desarrollar leucemia.

Al igual que el ácido sulfhídrico las concentraciones presentaron comportamiento muy variable dentro del cuarto de deshidratación, por lo que resultó útil realizar un análisis para comprobar que las concentraciones diarias varían de una forma aleatoria en el tiempo debido a la diversa composición de las aguas residuales y no están relacionadas con el ciclo de funcionamiento de la centrífuga, es decir que no existe igualdad entre las concentraciones diarias. Por lo que se debe de realizar un muestreo constante diario para poder establecer de una mejor manera los valores de las concentraciones medias de benceno a las que se expone un operario.

El benceno no tiende a adsorberse a los sedimentos formados, y su biodegradación anaerobia es muy lenta. Su presencia en la depuradora se debe a la gran cantidad de productos de uso diario, tanto en el ámbito comercial, como industrial y domestico, como es muy soluble en agua cualquier escape del mismo se ve muy fácilmente arrastrado por la lluvia.

En referencia a la metodología de muestreo de datos, el contraste estadístico de medias ha establecido que no se acepta la hipótesis de igualdad de medias, lo que nos permite determinar que para establecer un valor significativo de la media de la concentración de este gas en el proceso de deshidratación sería necesario realizar medidas de tipo continuo o al menos

series temporales diarias más extensas que permita recoger la variabilidad intrínseca asociada a este proceso.

- Tolueno

La concentración media de tolueno en la EDAR de Padul se mantuvo por debajo de los límites considerados en todos los puntos de muestreo, por lo que se puede decir que este compuesto por sí solo no representa un riesgo de exposición, sino que aumenta la toxicidad de la mezcla de gases que se encuentran al mismo tiempo en la atmósfera de trabajo, aumentando su peligrosidad. Su volatilidad es menor que la del benceno y ácido sulfhídrico por lo que es menos susceptible a emitirse por esta vía. Las concentraciones presentaron el mismo comportamiento, siendo mayores en el cuarto de deshidratación de fangos y en el tamiz de finos de la fase de pretratamiento. Debido a que la concentración media de este compuesto estuvo muy por debajo de los límites analizados no se le realizó el mismo análisis estadístico que al benceno y ácido sulfhídrico en el cuarto de deshidratación.

- Cumeno

La concentración detectada para el cumeno en los diferentes puntos de muestra de la EDAR de Padul se mantuvo por debajo de los límites de exposición analizados, mostrando el mismo comportamiento observado con valores más altos en el cuarto de deshidratación de fangos y en la zona operación del tamiz de finos. Al igual que el tolueno, por si solo, el cumeno no representa un riesgo de exposición, sino que aumenta la peligrosidad de la mezcla de gases encontrados.

- Estireno

Para este compuesto se detectaron niveles de concentración por debajo de los límites establecidos para la exposición laboral, alcanzando los valores más altos en el cuarto de deshidratación (1.1ppm) y en la zona de operación del tamiz de finos (0.4ppm), por lo que por sí solo no representa un peligro de exposición para el operario de planta, y al igual que los demás gases presentes en concentraciones menores a los límites de exposición, su presencia aumenta la peligrosidad de la mezcla de aire encontrada en las instalaciones, especialmente dentro del edificio de la planta. Este compuesto tiende a adsorberse a la fracción sólida de sedimentos, por lo que podría considerarse que no volatiliza en gran medida hasta que el fango es removido violentamente por la operación de la centrifuga, haciendo que se pueda detectar su concentración a bajos niveles.

- O-xileno

A pesar de haberse detectado la presencia de este compuesto en los diferentes puntos de toma de muestra los niveles de concentración no rebasaron los límites analizados en ninguno de los puntos, quedando muy por debajo de ellos. El o-xileno presentó el mismo comportamiento que todos los gases, habiéndose detectado la concentración más elevada en el cuarto de deshidratación y en el área de operación del tamiz de finos. Al ser insolubles en agua su volatilidad es muy sensible por lo que su emisión puede darse incluso antes de alcanzar la planta, llegando solamente una fracción de los mismos a concentrarse en la atmósfera de trabajo del operador.

CONCLUSIONES

En este trabajo se han realizado varias series de toma de datos de concentraciones en el aire de 6 compuestos, considerados como contaminantes del aire dentro de las instalaciones de una depuradora de aguas residuales de pequeño tamaño, obteniendo las siguientes conclusiones:

1. Dentro de la depuradora de aguas residuales de la EDAR del municipio de Padul, existen concentraciones de compuestos tóxicos y cancerígenos que rebasan los límites de exposición laboral recomendados por la Comisión Europea y el Instituto de Seguridad e Higiene en el Trabajo de España, específicamente de ácido sulfhídrico y de benceno en el área de operación del tamiz de finos, de la línea de agua, y en el cuarto de deshidratación de fangos, de la línea de fango, tal y como se puede apreciar en los mapas presentados en las figuras.
2. La concentración de gases en la atmósfera de trabajo del operario de la depuradora se debe, esencialmente, a los factores de ventilación y distribución espacial de los procesos y operaciones de tratamiento dentro del edificio de la planta, ya que los puntos críticos localizados se encuentran dentro de este edificio, no siendo así en los puntos de toma de muestra que se encuentran en operación al aire libre.
3. Las condiciones de operación del equipo extractor de olores del edificio no son las ideales para retirar de las instalaciones la gran cantidad de compuestos que son liberados en las distintas etapas del proceso de tratamiento.

4. Las concentraciones de sustancias peligrosas en estaciones depuradoras de agua residuales de pequeño tamaño han sido poco estudiadas en las diferentes plantas de la Provincia de Granada, por lo que este trabajo es una primera aproximación hacia la comprensión de las técnicas de muestreo y análisis del riesgo de exposición que enfrentan los operarios diariamente a compuestos peligrosos o a mezclas de varios gases en sus puestos de trabajo.

5. No existe variaciones no aleatorias en las medias de las series de datos de concentraciones diarias en el proceso de deshidratación de fangos, por lo que se propone realizar un monitoreo continuo y temporal para poder estimar de mejor manera los niveles de exposición a los que se enfrenta diariamente el operario de planta, con el fin de poder plantear de mejor manera medidas que disminuyan la absorción por vía de inhalación de sustancias tóxicas o cancerígenas.

RECOMENDACIONES

Como consecuencia de lo anterior, se realizan las siguientes recomendaciones obtenidas del procedimiento descrito en este trabajo:

1. Los sistemas de ventilación local y general, natural y mecánica, deben de ser analizados para determinar si algún cambio en los horarios de funcionamiento del equipo de extracción son suficientes o deben de incrementarse. Especialmente el cuarto de deshidratación cuenta con un puertas que se mantienen cerradas durante la operación de la centrifuga, estas puertas deberían de ser abiertas diariamente antes de la puesta en marcha del equipo.
2. En las operaciones donde se haya identificado niveles altos de concentración ambiental de compuestos contaminantes es importante el monitoreo de gases mediante detectores fijos y con un sistema de ventilación conectado a los sensores para ponerse en marcha en función de la concentración, estos sensores deben de ser calibrados periódicamente para comprobar su correcto funcionamiento.
3. Realizar un muestreo continuo y temporal anual de las concentraciones en el aire de compuestos tóxicos con diferentes condiciones de ventilación para poder relacionar los niveles altos con deficiencias en la circulación del aire dentro del recinto. También se podría comprobar la ventilación mediante el uso de algún medidor de corriente de aire.

4. Colocar en las oficinas de la EDAR de Padul los mapas de zonas de riesgo realizados en el presente trabajo, para que el operario y los visitantes conozcan las medidas de seguridad a tomar antes de realizar sus operaciones de mantenimiento diarias, así como señalar las zonas de riesgo adecuadamente indicando la sustancia y las medidas de seguridad a seguir.

5. Se le recomienda que los operarios utilicen máscaras con filtros para gases y vapores, y en casos extremos equipos de respiración autónomos o semiautónomos de aire durante la realización de las labores de mantenimiento en las zonas de riesgo identificadas.

6. Llevar a cabo estudios similares en otras plantas de tratamiento de aguas residuales de la Provincia de Granada para poder comparar los niveles de contaminación de atmósferas de trabajo según los diferentes procesos y operaciones dentro de cada planta, así como también evaluar las condiciones de ventilación de las mismas para poder realizar medidas correctivas y evitar la exposición a sustancias peligrosas de los operarios y visitantes de la EDAR.

BIBLIOGRAFÍA

1. Association of Municipal Sewerage Agencies (AMSA). *VOC emissions from wastewater treatment plants: characterization, control and compliance*. Parkasam Tata, Jay Witherspoon, Cecil Lue-Hing (eds). United States of America: Lewis Publishers, 2003. ISBN: 1566768209.
2. BAIRD, Colin. *Química ambiental*. Barcelona: Reverte, 2001. 622 p. ISBN: 842917902X.
3. CAPO MARTI, Miguel Andrés. *Principios de toxicología: diagnóstico, tratamiento y gestión del medio ambiente*. Madrid: McGraw-Hill, 2002. 314 p. ISBN: 8448136721.
4. GARCÍA Martínez, Francisco Javier. *Manual para operadores de pequeñas estaciones depuradoras de aguas residuales*. Granada: Diputación provincial de Granada, 2009. 254 p. ISBN: 9788478074860.
5. *Guía de buenas prácticas preventivas en estaciones depuradoras de aguas residuales*. Dirección de Seguridad e Higiene de ASEPEYO. España: 2009.
6. *Límites de exposición profesional para agentes químicos en España 2011*. Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo (INSHT). Madrid, 2011. p. 233.

7. *Ingeniería de aguas residuales: tratamiento, vertido y reutilización.* METCALF y Eddy, Inc. George Tchobanaglou, Franklin L. Burton (revisores). Madrid: McGraw-Hill, 1998. 1485 p. ISBN: 8448116070.
8. *MiniRAE 3000 Guía del usuario.* España, RAE Systems, 2007.
9. MORENO GRAU, María Dolores. *Toxicología ambiental: evaluación del riesgo para la salud humana.* Madrid: McGraw-Hill, 2003. 370 p. ISBN: 8448137817.
10. NEVERS, Noel de. *Ingeniería de control de la contaminación del aire.* José Pérez Castellano (trad). México: McGraw-Hill, 1997. 546 p. ISBN: 9701016823.
11. *Nota técnica TN-106.* España: RAE Systems 2008.
12. SAWYER, Clair N. *Chemistry for environmental engineering.* Boston: McGraw-Hill, 2003. 572 p. ISBN: 007119881.
13. SEOANEZ CALVO, Mariano. *Tratado de la contaminación atmosférica: problemas, tratamiento y gestión del medio ambiente.* Madrid: McGraw-Hill, 2002. 314 p. ISBN: 8484760359.
14. Sierra, Miguel A. *Principios de química medioambiental.* Madrid: Síntesis, 2007. 223 p. ISBN: 9788497565172.
15. *Total volatile organic compounds (TVOC) in indoor air quality investigations.* LuxemburgoEuropean Commission, Joint research center – Environment Institute. Luxemburgo, 1997

APÉNDICE

A. Datos registrados con el detector de COVs

- 25 de abril

Pretratamiento

<i>GAS DE MEDIDA</i>	<i>F.C.</i>	<i>LUGAR DE MUESTRA</i>	<i>RANGO</i>	<i>CONCENTRACIÓN [ppm]</i>
Ácido Sulfhídrico	3.3	Aliviadero	0.5	1.65
Ácido Sulfhídrico	3.3	Tamiz de gruesos	0.2-0.3	0.99
Ácido Sulfhídrico	3.3	Tamiz de finos	1-3.3	6.93
Ácido Sulfhídrico	3.3	Desarenador/grasa	6-10.7	9.24
Benceno	0.53	Aliviadero	0.2	0.106
Benceno	0.53	Tamiz de gruesos	0.2-0.3	0.159
Benceno	0.53	Tamiz de finos	0.4-0.6	0.265
Benceno	0.53	Desarenador/grasa	0.3-0.4	0.212
Cumeno	0.54	Aliviadero	0.3	0.162
Cumeno	0.54	Tamiz de gruesos	0.3	0.162
Cumeno	0.54	Tamiz de finos	0.4-0.6	0.324
Cumeno	0.54	Desarenador/grasa	1.1-1.8	0.648
Tolueno	0.5	Aliviadero	0.3	0.15
Tolueno	0.5	Tamiz de gruesos	0.3	0.15
Tolueno	0.5	Tamiz de finos	0.4-0.5	0.25
Tolueno	0.5	Desarenador/grasa	1.3-1.6	0.7

Reactor Biológico

<i>GAS DE MEDIDA</i>	<i>F.C.</i>	<i>LUGAR DE MUESTRA</i>	<i>RANGO</i>	<i>CONCENTRACIÓN [ppm]</i>
Ácido Sulfhídrico	3.3	Toma de muestra	0.7-0.8	2.64

Benceno	0.53	Toma muestra de	0.1	0.053
Cumeno	0.54	Toma muestra de	0.1	0.054
Tolueno	0.5	Toma muestra de	0.1	0.05
O-Xileno	0.46	Toma muestra de	0.1	0.046

Espesador de Fangos

GAS DE MEDIDA	F.C.	LUGAR DE MUESTRA	RANGO	CONCENTRACION [ppm]
Acido Sulfhídrico	3.3	Rejilla superior	1-3.3	7.59
Benceno	0.53	Rejilla superior	0.2-0.7	0.265
Cumeno	0.54	Rejilla superior	0.2-0.3	0.108
Tolueno	0.5	Rejilla superior	0.2-0.3	0.1
O-Xileno	0.46	Rejilla superior	0.1-0.6	0.184

Deshidratación de fangos

GAS DE MEDIDA	F.C.	LUGAR DE MUESTRA	RANGO	CONCENTRACION [ppm]
Acido Sulfhídrico	3.3	Centrifugadora	4-27.8	91.74
Benceno	0.53	Centrifugadora	3.2-5.5	2.915
Cumeno	0.54	Centrifugadora	0.8-5.4	2.916
Tolueno		fuera de servicio		

- 26 de abril

Pretratamiento

GAS DE MEDIDA	F.C.	LUGAR DE MUESTRA	RANGO DE C	CONCENTRACION [ppm]
Ácido Sulfhídrico	3.3	Aliviadero	0.3	0.99
Ácido Sulfhídrico	3.3	Tamiz de gruesos	0.2-0.4	0.99

Ácido Sulfhídrico	3.3	Tamiz de finos	1.6-1.4	8.25
Ácido Sulfhídrico	3.3	Desarenador/grasa	0.8-1	2.97
Benceno	0.53	Aliviadero	0.2	0.106
Benceno	0.53	Tamiz de gruesos	0.1-0.2	0.106
Benceno	0.53	Tamiz de finos	0.2-0.7	0.212
Benceno	0.53	Desarenador/grasa	0.2-0.3	0.106
Cumeno	0.54	Aliviadero	0.2	0.108
Cumeno	0.54	Tamiz de gruesos	0.2	0.108
Cumeno	0.54	Tamiz de finos	0.5-1.2	0.432
Cumeno	0.54	Desarenador/grasa	0.3	0.162
Tolueno	0.5	Aliviadero	0.2	0.1
Tolueno	0.5	Tamiz de gruesos	0.2	0.1
Tolueno	0.5	Tamiz de finos	0.3-0.7	0.25
Tolueno	0.5	Desarenador/grasa	0.3	0.15
Estireno	0.4	Aliviadero	0.1	0.04
Estireno	0.4	Tamiz de gruesos	0.1	0.04
Estireno	0.4	Tamiz de finos	0.2-0.5	0.16
Estireno	0.4	Desarenador/grasa	0.2	0.08
O-xileno	0.46	Aliviadero	0.2	0.092
O-xileno	0.46	Tamiz de gruesos	0.1-0.2	0.092
O-xileno	0.46	Tamiz de finos	0.4-0.7	0.23
O-xileno	0.46	Desarenador/grasa	0.2	0.092

Reactor biológico

GAS DE MEDIDA	F.C.	LUGAR DE MUESTRA	RANGO	CONCENTRACION [ppm]
Ácido Sulfhídrico	3.3	Toma de muestra	0.7-0.8	2.64
Benceno	0.53	Toma de muestra	0.1	0.053
Cumeno	0.54	Toma de muestra	0.1	0.054
Tolueno	0.5	Toma de muestra	0.1	0.05

Estireno	0.4	Toma muestra de	0.1	0.04
O-Xyleno	0.46	Toma muestra de	0.1	0.046

Espesador de fangos

GAS DE MEDIDA	F.C.	LUGAR DE MUESTRA	RANGO	CONCENTRACION [ppm]
Ácido Sulfhídrico	3.3	Rejilla superior	0.9	2.97
Benceno	0.53	Rejilla superior	0.1-0.3	0.106
Cumeno	0.54	Rejilla superior	0.1	0.054
Tolueno	0.5	Rejilla superior	0.1	0.05
Estireno	0.4		0.1	0.04
O-Xyleno	0.46	Rejilla superior	0.1	0.046

Deshidratación de fangos

Ácido Sulfhídrico	3.3	Centrifugadora	2.7-25	82.5
Benceno	0.53	Centrifugadora	0.5-2.9	1.537
Cumeno	0.54	Centrifugadora	0.4-2.3	1.242
Tolueno	0.5	Centrifugadora	0.3-2.1	1.05
Estireno	0.4	Centrifugadora	0.3-3.5	1.4
O-xyleno	0.46	Centrifugadora	0.8-3.4	1.564

- 27 de abril

Pretratamiento

GAS DE MEDIDA	F.C.	LUGAR DE MUESTRA	RANGO DE C	CONCENTRACIÓN
Ácido Sulfhídrico	3.3	Aliviadero	0.3-0.4	1.32
Ácido Sulfhídrico	3.3	Tamiz de gruesos	0.4-0.7	1.98
Ácido Sulfhídrico	3.3	Tamiz de finos	0.9-3.9	9.24
Ácido Sulfhídrico	3.3	Desarenador/grasa	1.1-1.4	3.96
Benceno	0.53	Aliviadero	0.2	0.106
Benceno	0.53	Tamiz de gruesos	0.2	0.106

Benceno	0.53	Tamiz de finos	0.4-0.9	0.318
Benceno	0.53	Desarenador/grasa	0.2-0.3	0.159
Cumeno	0.54	Aliviadero	0.2-0.3	0.108
Cumeno	0.54	Tamiz de gruesos	0.2	0.108
Cumeno	0.54	Tamiz de finos	0.3-1	0.324
Cumeno	0.54	Desarenador/grasa	0.3	0.162
Tolueno	0.5	Aliviadero	0.2	0.1
Tolueno	0.5	Tamiz de gruesos	0.2	0.1
Tolueno	0.5	Tamiz de finos	0.7-1.4	0.45
Tolueno	0.5	Desarenador/grasa	0.3	0.15
Estireno	0.4	Aliviadero	0.1	0.04
Estireno	0.4	Tamiz de gruesos	0.1-0.2	0.08
Estireno	0.4	Tamiz de finos	0.2-0.3	0.12
Estireno	0.4	Desarenador/grasa	0.2	0.08
O-xileno	0.46	Aliviadero	0.2	0.092
O-xileno	0.46	Tamiz de gruesos	0.2	0.092
O-xileno	0.46	Tamiz de finos	0.5-1.2	0.368
O-xileno	0.46	Desarenador/grasa	0.2-0.3	0.138

Reactor biológico

GAS DE MEDIDA	F.C.	LUGAR DE MUESTRA	RANGO	CONCENTRACIÓN [ppm]
Ácido Sulfhídrico	3.3	Toma de muestra	0.7	2.31
Benceno	0.53	Toma de muestra	0.1	0.053
Cumeno	0.54	Toma de muestra	0.1	0.054
Tolueno	0.5	Toma de muestra	0.1	0.05
Estireno	0.4	Toma de muestra	0.1	0.04
O-Xileno	0.46	Toma de muestra	0.1	0.046

Espesador de fangos

GAS DE MEDIDA	F.C.	LUGAR DE MUESTRA	RANGO	CONCENTRACIÓN [ppm]
Ácido Sulfhídrico	3.3	Rejilla superior	0.8	2.64

Benceno	0.53	Rejilla superior	0.1	0.053
Cumeno	0.54	Rejilla superior	0.1	0.054
Tolueno	0.5	Rejilla superior	0.1	0.05
Estireno	0.4	Rejilla superior	0.1	0.04
O-Xyleno	0.46	Rejilla superior	0.1	0.046

Deshidratación de fangos

GAS DE MEDIDA	F.C.	LUGAR DE MUESTRA	RANGO	CONCENTRACIÓN [ppm]
Ácido Sulfhídrico	3.3	Centrifugadora	1.2-19.4	64.02
Benceno	0.53	Centrifugadora	0.6-2.9	1.537
Cumeno	0.54	Centrifugadora	0.6-4.3	2.322
Tolueno	0.5	Centrifugadora	0.4-2.9	1.45
Estireno	0.4	Centrifugadora	0.2-0.8	0.32
O-xylene	0.46	Centrifugadora	0.7-3.8	1.748

- 4 de mayo

Pretratamiento

GAS DE MEDIDA	F.C.	LUGAR DE MUESTRA	RANGO DE C	CONCENTRACIÓN [ppm]
Ácido Sulfhídrico	3.3	Aliviadero	0.1-0.3	0.66
Ácido Sulfhídrico	3.3	Tamiz de gruesos	0.1-0.2	0.33
Ácido Sulfhídrico	3.3	Tamiz de finos	0.7-3.6	8.25
Ácido Sulfhídrico	3.3	Desarenador/grasa	0.6-0.9	2.64
Benceno	0.53	Aliviadero	0.1	0.053
Benceno	0.53	Tamiz de gruesos	0.1	0.053
Benceno	0.53	Tamiz de finos	0.4-1.0	0.318
Benceno	0.53	Desarenador/grasa	0.2-1.7	0.106
Cumeno	0.54	Aliviadero	0.2	0.108
Cumeno	0.54	Tamiz de gruesos	0.2	0.108
Cumeno	0.54	Tamiz de finos	0.3-0.9	0.324
Cumeno	0.54	Desarenador/grasa	0.2-0.3	0.108
Tolueno	0.5	Aliviadero	0.1	0.05

Tolueno	0.5	Tamiz de gruesos	0.1	0.05
Tolueno	0.5	Tamiz de finos	0.3-1.1	0.3
Tolueno	0.5	Desarenador/grasa	0.2	0.1
Estireno	0.4	Aliviadero	0.1	0.04
Estireno	0.4	Tamiz de gruesos	0.1	0.04
Estireno	0.4	Tamiz de finos	0.2-1.2	0.28
Estireno	0.4	Desarenador/grasa	0.2	0.08
O-xileno	0.46	Aliviadero	0.2	0.092
O-xileno	0.46	Tamiz de gruesos	0.2	0.092
O-xileno	0.46	Tamiz de finos	0.3-1.4	0.322
O-xileno	0.46	Desarenador/grasa	0.2	0.092

Reactor biológico

GAS DE MEDIDA	F.C.	LUGAR DE MUESTRA	RANGO	CONCENTRACIÓN [ppm]
Ácido Sulfhídrico	3.3	Toma de muestra	0.5	1.65
Benceno	0.53	Toma de muestra	0.1	0.053
Cumeno	0.54	Toma de muestra	0.1	0.054
Tolueno	0.5	Toma de muestra	0.1	0.05
Estireno	0.4	Toma de muestra	0.1	0.04
O-Xileno	0.46	Toma de muestra	0.1	0.046

Espesador de fangos

GAS DE MEDIDA	F.C.	LUGAR DE MUESTRA	RANGO	CONCENTRACIÓN [ppm]
Ácido Sulfhídrico	3.3	Rejilla superior	0.6	1.98
Benceno	0.53	Rejilla superior	0.1	0.053
Cumeno	0.54	Rejilla superior	0.1	0.054
Tolueno	0.5	Rejilla superior	0.1	0.05
Estireno	0.4	Rejilla superior	0.1	0.04
O-Xileno	0.46	Rejilla superior	0.1	0.046

Deshidratación de fangos

GAS DE MEDIDA	DE F.C.	LUGAR DE MUESTRA	RANGO	CONCENTRACIÓN [ppm]
Ácido Sulfhídrico	3.3	Centrifugadora	1.2-18.7	61.71
Benceno	0.53	Centrifugadora	0.3-1.7	0.901
Cumeno	0.54	Centrifugadora	0.2-5.8	3.132
Tolueno	0.5	Centrifugadora	0.3-5.1	2.55
Estireno	0.4	Centrifugadora	0.2-3.4	1.36
O-xileno	0.46	Centrifugadora	0.2-2.5	1.15

- 5 de mayo

Pretratamiento

GAS DE MEDIDA	F.C.	LUGAR DE MUESTRA	RANGO	CONCENTRACIÓN [ppm]
Ácido Sulfhídrico	3.3	Aliviadero	0.1-0.2	0.66
Ácido Sulfhídrico	3.3	Tamiz de gruesos	0.2-0.3	0.99
Ácido Sulfhídrico	3.3	Tamiz de finos	1.9-3.6	8.25
Ácido Sulfhídrico	3.3	Desarenador/grasa	0.4-0.5	1.65
Benceno	0.53	Aliviadero	0.1	0.053
Benceno	0.53	Tamiz de gruesos	0.1	0.053
Benceno	0.53	Tamiz de finos	0.3-0.9	0.318
Benceno	0.53	Desarenador/grasa	0.2	0.106
Cumeno	0.54	Aliviadero	0.2	0.108
Cumeno	0.54	Tamiz de gruesos	0.2	0.108
Cumeno	0.54	Tamiz de finos	0.8-1.5	0.594
Cumeno	0.54	Desarenador/grasa	0.4	0.216
Tolueno	0.5	Aliviadero	0.2	0.1
Tolueno	0.5	Tamiz de gruesos	0.2	0.1
Tolueno	0.5	Tamiz de finos	0.4-1.1	0.3
Tolueno	0.5	Desarenador/grasa	0.2-0.3	0.15
Estireno	0.4	Aliviadero	0.2-0.3	0.08
Estireno	0.4	Tamiz de gruesos	0.2	0.08
Estireno	0.4	Tamiz de finos	0.5-1.3	0.32
Estireno	0.4	Desarenador/grasa	0.2	0.08
O-xileno	0.46	Aliviadero	0.2	0.092
O-xileno	0.46	Tamiz de gruesos	0.2	0.092

O-xileno	0.46	Tamiz de finos	0.8-1.2	0.46
O-xileno	0.46	Desarenador/grasa	0.2-0.3	0.138

Reactor biológico

GAS DE MEDIDA	F.C.	LUGAR DE MUESTRA	RANGO	CONCENTRACIÓN [ppm]
Ácido Sulfhídrico	3.3	Toma de muestra	0.6	1.98
Benceno	0.53	Toma de muestra	0.1	0.053
Cumeno	0.54	Toma de muestra	0.1	0.054
Tolueno	0.5	Toma de muestra	0.1	0.05
Estireno	0.4	Toma de muestra	0.1	0.04
O-Xileno	0.46	Toma de muestra	0.1	0.046

Espesador de fangos

GAS DE MEDIDA	F.C.	LUGAR DE MUESTRA	RANGO	CONCENTRACIÓN [ppm]
Ácido Sulfhídrico	3.3	Rejilla superior	0.7-1.1	2.97
Benceno	0.53	Rejilla superior	0.1-0.2	0.106
Cumeno	0.54	Rejilla superior	0.1-0.2	0.108
Tolueno	0.5	Rejilla superior	0.1	0.05
Estireno	0.4	Rejilla superior	0.1	0.04
O-Xileno	0.46	Rejilla superior	0.1	0.046

Deshidratación de fangos

GAS DE MEDIDA	F.C.	LUGAR DE MUESTRA	RANGO	CONCENTRACIÓN [ppm]
Ácido Sulfhídrico	3.3	Centrifugadora	0.7-11.8	38.94
Benceno	0.53	Centrifugadora	0.2-4.1	2.173
Cumeno	0.54	Centrifugadora	0.5-6.2	3.348
Tolueno	0.5	Centrifugadora	0.3-3.9	1.95
Estireno	0.4	Centrifugadora	0.4-3.6	1.44
O-xileno	0.46	Centrifugadora	0.3-4.8	2.208

- 6 de mayo

Pretratamiento

GAS DE MEDIDA	F.C.	LUGAR DE MUESTRA	RANGO	CONCENTRACIÓN [ppm]
Ácido Sulfhídrico	3.3	Aliviadero	0.9-1.3	3.63
Ácido Sulfhídrico	3.3	Tamiz de gruesos	0.9-1.4	3.3
Ácido Sulfhídrico	3.3	Tamiz de finos	6.9-9.1	24.75
Ácido Sulfhídrico	3.3	Desarenador/grasa	2-2.1	6.6
Benceno	0.53	Aliviadero	0.1	0.053
Benceno	0.53	Tamiz de gruesos	0.1	0.053
Benceno	0.53	Tamiz de finos	0.4-1.2	0.424
Benceno	0.53	Desarenador/grasa	0.2	0.106
Cumeno	0.54	Aliviadero	0.1-0.2	0.054
Cumeno	0.54	Tamiz de gruesos	0.1	0.054
Cumeno	0.54	Tamiz de finos	0.4-1.4	0.324
Cumeno	0.54	Desarenador/grasa	0.2	0.108
Tolueno	0.5	Aliviadero	0.1	0.05
Tolueno	0.5	Tamiz de gruesos	0.1	0.05
Tolueno	0.5	Tamiz de finos	0.4-1.3	0.35
Tolueno	0.5	Desarenador/grasa	0.2	0.1
Estireno	0.4	Aliviadero	0.1	0.04
Estireno	0.4	Tamiz de gruesos	0.1	0.04
Estireno	0.4	Tamiz de finos	0.4-1.3	0.28
Estireno	0.4	Desarenador/grasa	0.2	0.08
O-xileno	0.46	Aliviadero	0.1	0.046
O-xileno	0.46	Tamiz de gruesos	0.1	0.046
O-xileno	0.46	Tamiz de finos	0.4-1.4	0.414
O-xileno	0.46	Desarenador/grasa	0.2	0.092

Reactor biológico

GAS DE MEDIDA	F.C.	LUGAR DE MUESTRA	RANGO	CONCENTRACIÓN [ppm]
Ácido Sulfhídrico	3.3	Toma de muestra	0.5-0.6	1.98
Benceno	0.53	Toma de	0.1	0.053

		muestra		
Cumeno	0.54	Toma muestra	de	0.1
				0.054
Tolueno	0.5	Toma muestra	de	0.1
				0.05
Estireno	0.4	Toma muestra	de	0.1
				0.04
O-Xyleno	0.46	Toma muestra	de	0.1
				0.046

Espesador de fangos

GAS DE MEDIDA	F.C.	LUGAR DE MUESTRA	RANGO	CONCENTRACIÓN [ppm]
Ácido Sulfhídrico	3.3	Rejilla superior	0.7-1.2	2.97
Benceno	0.53	Rejilla superior	0.1	0.053
Cumeno	0.54	Rejilla superior	0.1-0.2	0.054
Tolueno	0.5	Rejilla superior	0.1	0.05
Estireno	0.4	Rejilla superior	0.1	0.04
O-Xyleno	0.46	Rejilla superior	0.1	0.046

Deshidratación de fangos

GAS DE MEDIDA	F.C.	LUGAR DE MUESTRA	RANGO	CONCENTRACIÓN [ppm]
Ácido Sulfhídrico	3.3	Centrifugadora	3.3-33.1	109.23
Benceno	0.53	Centrifugadora	0.1-2.9	1.537
Cumeno	0.54	Centrifugadora	0.3-6.5	3.51
Tolueno	0.5	Centrifugadora	0.2-2.2	1.1
Estireno	0.4	Centrifugadora	0.2-1.6	0.64
O-xyleno	0.46	Centrifugadora	0.2-4.3	1.978

- 10 de mayo

Pretratamiento

GAS DE MEDIDA	F.C.	LUGAR DE MUESTRA	RANGO	CONCENTRACIÓN [ppm]
Ácido Sulfhídrico	3.3	Aliviadero	0.2-0.3	0.99
Ácido Sulfhídrico	3.3	Tamiz de gruesos	0.3-0.4	1.32

Ácido Sulfhídrico	3.3	Tamiz de finos	1.1-6.6	13.2
Ácido Sulfhídrico	3.3	Desarenador/gras a	1.1-1.2	3.96
Benceno	0.53	Aliviadero	0.1	0.053
Benceno	0.53	Tamiz de gruesos	0.1	0.053
Benceno	0.53	Tamiz de finos	0.3-1	0.424
Benceno	0.53	Desarenador/gras a	0.2-0.3	0.106
Cumeno	0.54	Aliviadero	0.1-0.2	0.108
Cumeno	0.54	Tamiz de gruesos	0.1-0.2	0.108
Cumeno	0.54	Tamiz de finos	0.6-1.3	0.486
Cumeno	0.54	Desarenador/gras a	0.2-0.3	0.108
Tolueno	0.5	Aliviadero	0.1	0.05
Tolueno	0.5	Tamiz de gruesos	0.1	0.05
Tolueno	0.5	Tamiz de finos	0.5-1.2	0.45
Tolueno	0.5	Desarenador/gras a	0.2	0.1
Estireno	0.4	Aliviadero	0.1-0.3	0.04
Estireno	0.4	Tamiz de gruesos	0.1	0.04
Estireno	0.4	Tamiz de finos	0.5-0.9	0.28
Estireno	0.4	Desarenador/gras a	0.2	0.08
O-xileno	0.46	Aliviadero	0.2	0.092
O-xileno	0.46	Tamiz de gruesos	0.1-0.2	0.092
O-xileno	0.46	Tamiz de finos	0.5-1.7	0.46
O-xileno	0.46	Desarenador/gras a	0.2-0.3	0.092

Reactor biológico

GAS DE MEDIDA	F.C.	LUGAR DE MUESTRA	RANGO	CONCENTRACIÓN [ppm]
Ácido Sulfhídrico	3.3	Toma de muestra	0.7	2.31
Benceno	0.53	Toma de muestra	0.1	0.053
Cumeno	0.54	Toma de muestra	0.1	0.054
Tolueno	0.5	Toma de muestra	0.1	0.05
Estireno	0.4	Toma de muestra	0.1	0.04
O-Xileno	0.46	Toma de muestra	0.1	0.046

Espesador de fangos

GAS DE MEDIDA	F.C.	LUGAR DE MUESTRA	RANGO	CONCENTRACIÓN [ppm]
Ácido Sulfhídrico	3.3	Rejilla superior	0.8	2.64
Benceno	0.53	Rejilla superior	0.1	0.053
Cumeno	0.54	Rejilla superior	0.1	0.054
Tolueno	0.5	Rejilla superior	0.1	0.05
Estireno	0.4	Rejilla superior	0.1	0.04
O-Xyleno	0.46	Rejilla superior	0.1-0.2	0.092

Deshidratación de fangos

GAS DE MEDIDA	F.C.	LUGAR DE MUESTRA	RANGO	CONCENTRACIÓN [ppm]
Ácido Sulfhídrico	3.3	Centrifugadora	1.1-23.6	77.88
Benceno	0.53	Centrifugadora	0.3-5.6	2.968
Cumeno	0.54	Centrifugadora	0.3-5.5	2.97
Tolueno	0.5	Centrifugadora	0.2-3.8	1.9
Estireno	0.4	Centrifugadora	0.2-3.4	1.36
O-xylene	0.46	Centrifugadora	0.2-2.9	1.334

- 11 de mayo

Pretratamiento

GAS DE MEDIDA	F.C.	LUGAR DE MUESTRA	RANGO	CONCENTRACIÓN [ppm]
Ácido Sulfhídrico	3.3	Aliviadero	0.2-0.4	1.32
Ácido Sulfhídrico	3.3	Tamiz de gruesos	0.4	1.32
Ácido Sulfhídrico	3.3	Tamiz de finos	2-3.6	8.58
Ácido Sulfhídrico	3.3	Desarenador/grasa	1.1	3.63
Benceno	0.53	Aliviadero	0.1	0.053
Benceno	0.53	Tamiz de gruesos	0.2	0.106
Benceno	0.53	Tamiz de finos	0.5-0.7	0.318

Benceno	0.53	Desarenador/grasa	0.2-0.3	0.106
Cumeno	0.54	Aliviadero	0.2	0.108
Cumeno	0.54	Tamiz de gruesos	0.2	0.108
Cumeno	0.54	Tamiz de finos	1-1.5	0.756
Cumeno	0.54	Desarenador/grasa	0.3	0.162
Tolueno	0.5	Aliviadero	0.2	0.1
Tolueno	0.5	Tamiz de gruesos	0.1-0.2	0.1
Tolueno	0.5	Tamiz de finos	0.4-0.7	0.3
Tolueno	0.5	Desarenador/grasa	0.3	0.15
Estireno	0.4	Aliviadero	0.1	0.04
Estireno	0.4	Tamiz de gruesos	0.1-0.2	0.08
Estireno	0.4	Tamiz de finos	0.5-0.9	0.32
Estireno	0.4	Desarenador/grasa	0.2	0.08
O-xileno	0.46	Aliviadero	0.2	0.092
O-xileno	0.46	Tamiz de gruesos	0.2	0.092
O-xileno	0.46	Tamiz de finos	1-1.3	0.598
O-xileno	0.46	Desarenador/grasa	0.2-0.3	0.092

Reactor biológico

GAS DE MEDIDA	F.C.	LUGAR DE MUESTRA	RANGO	CONCENTRACIÓN [ppm]
Ácido Sulfhídrico	3.3	Toma de muestra	0.8	2.64
Benceno	0.53	Toma de muestra	0.1	0.053
Cumeno	0.54	Toma de muestra	0.1	0.054
Tolueno	0.5	Toma de muestra	0.1	0.05
Estireno	0.4	Toma de muestra	0.1	0.04
O-Xileno	0.46	Toma de muestra	0.1	0.046

Espesador de fangos

GAS DE MEDIDA	F.C.	LUGAR DE MUESTRA	RANGO	CONCENTRACIÓN [ppm]
Ácido Sulfhídrico	3.3	Rejilla superior	0.8-0.9	2.97
Benceno	0.53	Rejilla superior	0.1	0.053
Cumeno	0.54	Rejilla superior	0.1-0.2	0.108
Tolueno	0.5	Rejilla superior	0.1-0.2	0.1
Estireno	0.4	Rejilla superior	0.1	0.04
O-Xyleno	0.46	Rejilla superior	0.1	0.046

Deshidratación de fangos

GAS DE MEDIDA	F.C.	LUGAR DE MUESTRA	RANGO	CONCENTRACIÓN [ppm]
Ácido Sulfhídrico	3.3	Centrifugadora	1-21.7	71.61
Benceno	0.53	Centrifugadora	0.2-3.3	1.749
Cumeno	0.54	Centrifugadora	0.2-0.8	0.432
Tolueno	0.5	Centrifugadora	0.3-3.3	1.65
Estireno	0.4	Centrifugadora	0.2-3.1	1.24
O-xyleno	0.46	Centrifugadora	1-2.8	1.288

B. Series de datos en el cuarto de deshidratación

• **ÁCIDO SULFHÍDRICO**

Concentraciones en ppm

4 de mayo	5 de mayo	6 de mayo	10 de mayo	No. muestra
10.89	4.95	76.89	36.3	1
43.56	3.96	43.56	21.12	2
10.23	3.3	22.44	73.92	3
5.94	3.63	10.23	32.67	4
4.62	3.63	35.31	52.47	5
35.97	4.62	29.37	15.51	6
27.72	2.97	37.95	9.57	7
5.61	4.29	14.19	8.25	8
40.26	5.94	21.12	9.9	9
9.24	4.62	17.82	16.83	10

19.8	5.28	55.44	12.54	11
33.66	11.88	47.85	18.81	12
59.73	16.5	32.67	16.17	13
38.94	42.57	52.8	31.02	14
11.88	79.53	45.54	12.87	15
4.95	4.95	19.8	13.86	16
31.68	4.29	90.09	11.88	17
11.22	4.95	38.28	11.22	18
5.94	9.9	32.67	9.24	19
6.93	5.61	14.19	6.6	20
6.27	4.62	25.08	5.61	21
29.7	3.3	40.92	3.96	22
30.69	4.95	44.22	5.94	23
31.02	5.94	53.13	6.6	24
6.6	5.28	16.17	31.02	25
39.6	3.96	14.19	42.24	26
64.68	5.28	25.08	26.4	27
90.42	4.62	40.92	16.5	28
5.28	2.97	44.22	27.39	29
9.24	4.29	53.13	10.23	30
41.91	3.3	16.17	8.58	31
30.69	3.63	80.19	10.56	32
7.59	3.96	38.28	12.21	33
4.62	3.3	12.21	68.31	34
5.61	18.15	43.56	11.88	35
30.69	9.57	63.36	14.85	36
7.59	11.88	64.35	25.08	37
4.62	21.12	78.21	67.65	38
5.61	31.35	70.29	17.16	39
36.3	64.35	111.87	48.51	40
5.94	6.27	104.61	38.61	41
35.97	25.41	39.93	17.49	42
32.01	9.57	31.02	51.81	43
24.42	10.89	6.6	34.98	44
11.22	3.96	14.85	24.42	45
6.6	12.54	16.17	13.86	46
6.6	39.27	36.63	17.16	47
7.26	13.2	35.64	22.77	48
8.91	5.28	40.59	19.14	49
51.81	22.44	34.98	19.8	50

36.3	5.61	22.77	6.93	51
25.08	4.95	69.96	25.41	52
8.58	9.24	44.88	28.71	53
14.52	9.9	83.16	5.28	54
56.1	8.58	70.29	25.74	55
37.62	16.5	65.01	45.87	56
56.43	16.17	67.98	65.01	57
64.35	6.27	87.78	22.11	58
25.08	9.24	116.82	21.12	59
8.25	6.93	65.34	21.12	60

BENCENO

Concentraciones en ppm

4 de mayo	5 de mayo	6 de mayo	10 de mayo	No. muestra
0.106	0.212	1.59	0.265	1
0.106	0.265	1.802	0.53	2
0.106	0.106	1.855	1.113	3
0.212	0.106	1.325	0.424	4
0.159	0.159	1.802	0.159	5
0.159	0.424	1.113	0.424	6
0.848	0.477	1.431	1.166	7
0.106	0.371	1.484	1.06	8
0.371	0.159	1.59	0.106	9
0.106	0.424	0.424	0.742	10
0.159	0.477	0.212	1.325	11
0.159	0.371	1.166	0.212	12
0.371	0.159	1.537	0.106	13
0.689	0.212	1.59	1.113	14
1.219	0.159	1.219	1.961	15
1.643	0.212	0.477	0.371	16
0.477	0.636	0.318	1.537	17
0.742	0.371	1.484	0.265	18
0.583	0.106	0.901	0.795	19
0.159	0.106	0.848	1.113	20
0.477	0.689	0.318	1.219	21
0.159	0.159	1.484	0.477	22
0.159	0.106	0.901	0.159	23
1.855	0.106	0.848	0.106	24
1.325	0.106	0.318	0.159	25
2.862	0.106	0.742	0.371	26

0.212	0.424	1.272	0.583	27
0.318	0.159	0.795	0.689	28
0.159	0.106	1.484	0.477	29
0.106	0.106	0.159	0.212	30
0.106	0.106	0.159	0.159	31
0.53	0.159	0.53	0.265	32
0.901	0.053	0.848	0.795	33
0.742	0.053	1.272	1.325	34
1.484	1.908	1.59	0.318	35
1.007	0.106	1.007	0.318	36
0.53	0.106	1.272	0.318	37
0.159	0.795	1.219	0.212	38
0.901	0.265	1.272	0.318	39
0.901	0.265	0.53	0.159	40
2.279	0.106	0.53	0.212	41
1.696	0.477	0.212	0.265	42
0.318	1.961	0.159	0.583	43
0.583	0.265	0.159	0.53	44
0.159	0.318	1.484	0.212	45
0.371	0.689	1.166	0.212	46
0.212	0.106	1.219	0.159	47
0.159	0.106	1.59	1.113	48
0.106	0.106	0.795	0.53	49
0.159	1.537	1.961	0.689	50
0.106	0.106	1.537	0.212	51
0.212	0.159	1.961	0.424	52
1.431	0.159	1.537	0.742	53
1.59	0.159	1.961	0.477	54
0.159	0.106	2.491	0.318	55
0.106	0.636	2.014	0.424	56
0.795	0.689	0.424	0.742	57

Fuente: elaboración propia.