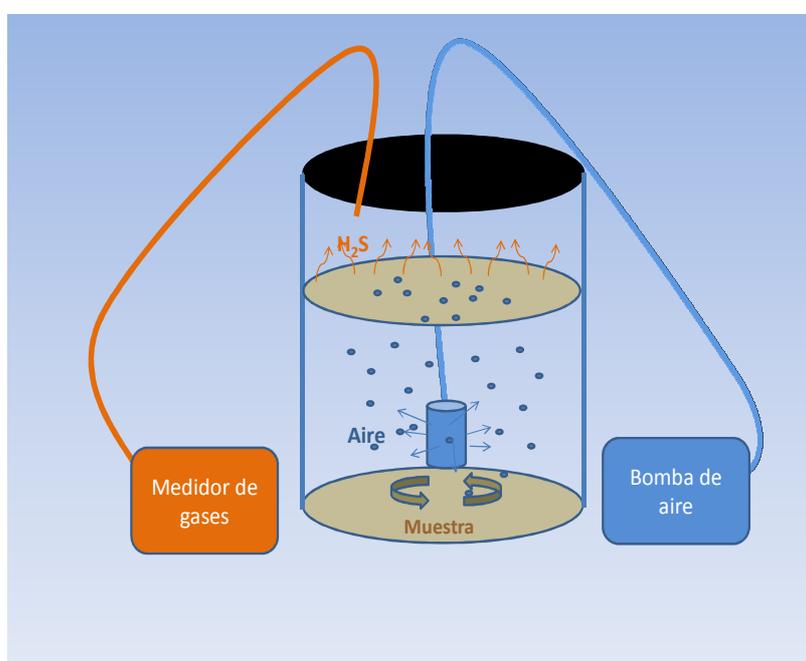




Escuela Técnica Superior de Ingeniería  
Agronómica  
Universidad Politécnica de Cartagena  
MÁSTER EN PLANIFICACIÓN Y GESTIÓN DE  
RECURSOS HÍDRICOS



# ESTUDIO DE LA ELIMINACIÓN Y DE LA PREVENCIÓN DE LA GENERACIÓN DE SULFUROS EN REDES DE SANEAMIENTO



TRABAJO FIN DE MÁSTER  
MÁSTER EN PLANIFICACIÓN Y GESTIÓN DE RECURSOS  
HÍDRICOS  
RAQUEL ROCA HERNÁNDEZ

**Dirigido por:**

Juan Tomás García Bermejo

Cartagena, Octubre 2012



## AGRADECIMIENTOS

En primer lugar me gustaría agradecer a mi director de proyecto D. Juan García Bermejo, responsable del área de obras de Aquagest Región de Murcia y docente del Máster en Planificación y Gestión de Recursos Hídricos, por la oportunidad que me ha brindado para realizar este proyecto y aprender de él, al Excelentísimo Ayuntamiento de Cartagena en especial a Dña. María José Hernández Bas, jefa de promoción de salud y de laboratorio del Ayuntamiento de Cartagena, por permitir la realización de la fase experimental del proyecto en el laboratorio, su asesoramiento y apoyo, así como al equipo técnico tanto de Aquagest Región de Murcia como del Laboratorio Municipal de Cartagena.

## ÍNDICE

<b>RESUMEN</b>	<b>1</b>
<b>Capítulo 1. INTRODUCCIÓN. CARACTERIZACIÓN Y ESTUDIO DE LOS SULFUROS EN AGUAS RESIDUALES</b>	<b>3</b>
1.1. Características generales de un agua residual urbana	3
1.2. Influencia del oxígeno en la generación de sulfuros	5
1.3. Estudio de los sulfuros en el agua residual	8
1.4. Estudio de la aireación en conducciones de agua	17
1.4.1. Inyección de aire en tuberías de impulsión	17
1.4.2. Aireación en tuberías de gravedad	19
<b>Capítulo 2. MATERIALES Y MÉTODOS</b>	<b>21</b>
<b>Capítulo 3. ESTUDIOS REALIZADOS</b>	<b>31</b>
3.1. Estudios de la permanencia de oxígeno y eliminación de sulfuros en muestras aplicando inyección de aire	31
3.1.1. Estudios de la permanencia de oxígeno y eliminación de sulfuros en muestras a un mismo caudal de aire inyectado	31
3.1.2. Estudios de la permanencia de oxígeno y eliminación de sulfuros en muestras a diferentes caudales de aire inyectado	59
3.2. Estudio de la eliminación de sulfuros y compuestos reducidos de azufre en muestras mediante ventilación de la atmósfera de la muestra.	75
3.2.1. Estudio de la eliminación de sulfuros en muestras mediante ventilación.	78
3.2.2. Estudio de la eliminación de sulfuros y sulfitos en muestras mediante ventilación.	81
3.2.3. Estudio de la eliminación de compuestos reducidos de azufre en muestras mediante ventilación y su balance de masas	85

<b>3.3.</b>	<b>Estudio de la inyección de aire a presión en tuberías de impulsión</b>	<b>96</b>
<b>3.3.1.</b>	<b>Estudio de la inyección de aire a presión en tuberías de impulsión en Alumbres</b>	<b>99</b>
<b>3.3.2.</b>	<b>Estudio de la inyección de aire a presión en tuberías de impulsión en el Mar Menor</b>	<b>102</b>
	<b>CONCLUSIONES</b>	<b>122</b>
	<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	<b>124</b>
	<b>ANEXO I</b>	<b>127</b>
	<b>ANEXO II</b>	<b>140</b>
	<b>ANEXO III</b>	<b>150</b>
	<b>ANEXO IV</b>	<b>158</b>

## TABLAS

Tabla 1.1 Composición característica de las aguas residuales .....	5
Tabla 1.2 Reacciones características de oxidación-reducción de compuestos del azufre en aguas residuales. ....	9
Tabla 1.3 solubilidad de H <sub>2</sub> S en el agua a diferentes temperaturas a la presión de 1 atmósfera. Handbook of chemistry and physics .....	10
Tabla 1.4 Constante de Henry en Atmósferas, para presiones bajas, Mills 1995. ....	11
Tabla 1.5 Constante de Henry en Atmósferas, para presiones bajas, Mills 1995. ....	13
Tabla 1.6 Valores de H <sub>2</sub> S, HS <sup>-</sup> y S <sup>=</sup> disueltos en equilibrio con diferentes concentraciones de H <sub>2</sub> S gas .....	15
Tabla 1.8 Valores obtenidos en experiencias de inyección directa de aire a presión .	19
Tabla 2.1 Equipos compresores .....	30
Tabla 3.1 Duración de las distintas fases del tratamiento .....	32
Tabla 3.2 Evolución de la concentración de ácido sulfhídrico liberado en el tratamiento.....	33
Tabla 3.3 Concentración de oxígeno disuelto en el tratamiento .....	36
Tabla 3.4 Evolución de los sulfuros disueltos en el tratamiento. ....	57
Tabla 3.5 Caudales de aire suministrados .....	59
Tabla 3.6 Medida máxima del ácido Sulfhídrico. ....	61
Tabla 3.7 Tiempo en alcanzar la máxima concentración de ácido sulfhídrico .....	63
Tabla 3.8 Medida de ácido sulfhídrico al final de los 10 minutos de inyección de aire. 65	
Tabla 3.9 Medida de la concentración de oxígeno disuelto al final de 10 minutos de inyección de aire. ....	67
Tabla 3.10 Medida de la concentración de oxígeno disuelto 30 minutos después de la inyección de aire .....	69
Tabla 3.11 Concentración de sulfuros disueltos .....	71
Tabla 3.12 Contenido en sulfatos.....	72
Tabla 3.13 Medida de la DBO <sub>5</sub> .....	73
Tabla 3.14 Características de la ventilación en el caso de Murcia .....	76
Tabla 3.15 Notación de los ensayos en función de la tasa de renovación.....	77
Tabla 3.15 Distintos supuestos de ventilación de aire .....	78
Tabla 3.17 Medidas de los compuestos reducidos del azufre. ....	79
Tabla 3.18 Medidas de compuestos con azufre. ....	82
Tabla 3.19 Concentraciones de los diferentes compuestos medidos .....	87
Tabla 3.20 Concentración de azufre correspondiente a los compuestos medidos .....	88
Tabla 3.21 Balance de masas para la muestra A.....	90
Tabla 3.22 Resultados del balance de masas para la muestra A.....	90
Tabla 3.23 Balance de masas para la muestra B.....	91
Tabla 3.24 Resultados del balance de masas para la muestra B.....	91
Tabla 3.25 Balance de masas para la muestra C.....	92
Tabla 3.26 Resultados del balance de masas para la muestra C.....	92
Tabla 3.27 Balance de masas para la muestra D.....	93
Tabla 3.28 Resultados del balance de masas para la muestra D.....	93
Tabla 3.29 Balance de masas para la muestra D.....	94
Tabla 3.30 Resultados del balance de masas para la muestra E.....	94

Tabla 3.31 Características de las impulsiones de agua residual. ....	105
Tabla 3.32 Características de los equipos compresores. ....	106
Tabla 3.33 Masa de oxígeno en 1 hora para las condiciones de funcionamiento de las estaciones de bombeo. ....	115
Tabla 3.34 Ratio (oxígeno inyectado / oxígeno consumido) (kg/h m <sup>2</sup> ).....	115
Tabla 3.34 Concentraciones de oxígeno y sulfuros disueltos sin inyección de aire en Playa Honda IA. ....	116
Tabla 3.35 Presiones y caudales de agua y aire y concentraciones de oxígeno y sulfuros disueltos con inyección de aire en Playa Honda IA.....	116
Tabla 3.36 Concentraciones de oxígeno y sulfuros disueltos previas sin inyección de aire en Playa Honda IB. ....	117
Tabla 3.37 Presiones y caudales de agua y aire y concentraciones de oxígeno y sulfuros disueltos con inyección de aire en Playa Honda IB.....	117
Tabla 3.38 Concentraciones de oxígeno y sulfuros disueltos sin inyección de aire en Playa Honda II. ....	118
Tabla 3.39 Presiones y caudales de agua y aire y concentraciones de oxígeno y sulfuros disueltos con inyección de aire en Playa Honda II. ....	118
Tabla 3.40 Concentraciones de oxígeno y sulfuros disueltos sin inyección de aire en Mar de Cristal. ....	119
Tabla 3.41 Presiones y caudales de agua y aire y concentraciones de oxígeno y sulfuros disueltos con inyección de aire en Mar de Cristal. ....	119
Tabla 3.42 Concentraciones de oxígeno y sulfuros disueltos sin inyección de aire en Playa Paraíso. ....	120
Tabla 3.43 Presiones y caudales de agua y aire y concentraciones de oxígeno y sulfuros disueltos con inyección de aire en Playa Paraíso. ....	120

## FIGURAS

Figura 1.1 Estructura del biofilm en las tuberías .....	6
Figura 1.2 Ciclo del azufre .....	8
Figura 1.3 Equilibrio de la concentración H <sub>2</sub> S en aire, EPA 1985.....	12
Figura 1.4 Composición de H <sub>2</sub> S, HS <sup>-</sup> y S <sup>=</sup> disueltos en equilibrio a diferentes valores de pH.....	15
Figura 1.5 Composición de H <sub>2</sub> S y HS <sup>-</sup> disueltos en equilibrio a diferentes valores de pH.....	16
Figura 1.6 Inyección directa de aire comprimido .....	18
Figura 2.1 Equipos del ensayo 1.....	22
Figura 2.2 Equipos del ensayo 2.....	24
Figura 2.3 Equipo compresor y punto de medición del ensayo 3. ....	25
Figura 2.4 Equipos del ensayo 3.....	25
Figura 3.1 Muestras usadas en el ensayo.....	31
Figura 3.2 Evolución de la concentración de ácido sulfhídrico liberado en el tratamiento .....	34
Figura 3.3 Valor promedio de la concentración de ácido sulfhídrico liberado en el tratamiento.....	34
Figura 3.4 Evolución de la concentración de oxígeno disuelto en el tratamiento. ....	55
Figura 3.5 Promedio de la evolución de la concentración de oxígeno disuelto en el tratamiento.....	55
Figura 3.6 Evolución de los sulfuros disueltos en el tratamiento. ....	58
Figura 3.7 Muestras usadas en el ensayo.....	60
Figura 3.8 Medida máxima del ácido sulfhídrico. ....	62
Figura 3.9 Promedio de la medida máxima del ácido sulfhídrico.....	62
Figura 3.10 Tiempo en alcanzar la máxima concentración de ácido Sulfhídrico.....	64
Figura 3.11 Promedio del tiempo en alcanzar la máxima concentración de ácido Sulfhídrico.....	64
Figura 3.12 Medida de ácido sulfhídrico al final de los 10 minutos de inyección de aire. ....	65
Figura 3.13 Promedio de la medida de ácido sulfhídrico al final de los 10 minutos de inyección de aire.....	66
Figura 3.14 Concentración de oxígeno disuelto al final de los 10 minutos de inyección de aire. ....	68
Figura 3.15 Promedio de la concentración de oxígeno disuelto al final de los 10 minutos de inyección de aire.....	68
Figura 3.16 Medida de la concentración de oxígeno disuelto 30 minutos después de la inyección de aire.....	69
Figura 3.17 Promedio de la concentración de Oxígeno disuelto 30 minutos después de la inyección de aire. ....	70
Figura 3.18 contenido en sulfuros disueltos antes del tratamiento de inyección de aire y tras aplicarle el caudal de 2.25 L/min.....	71
Figura 3.21 Medida de los sulfuros disueltos. ....	81
Figura 3.22 Medida de los compuestos del azufre previos al tratamiento .....	83
Figura 3.23 Medida de los compuestos del azufre al final del tratamiento.....	83

Figura 3.24 Balance de sulfuros .....	84
Figura 3.25 Balance se sulfitos .....	84
Figura 3.26 Balance de sulfatos.....	85
Figura 3.27 Balance de compuestos de azufre .....	89
Figura 3.28 Balance de compuestos de azufre .....	89
Figura 3.30 Tasa de oxígeno consumida inicialmente en muestras medidas en el laboratorio con atmósfera de aire .....	97
Figura 3.31 Perfil Longitudinal de la impulsión .....	100
Figura 3.32 Concentración de oxígeno disuelto y ácido sulfhídrico sin inyección de aire en Alumbres. ....	101
Figura 3.33 Concentración de oxígeno disuelto y ácido sulfhídrico con inyección de aire en Alumbres.....	101
Figura 3.34 Plano de la zona del Mar Menor donde se ha llevado a cabo la actuación. ....	103
Figura 3.35 Equipo compresor	Figura 3.36 Equipo compresor ... 104
Figura 3.37 Control de presión en la línea	Figura 3.38 Punto de medición... 104
Figura 3.39 Muestreo del oxígeno disuelto	Figura 3.40 Arqueta de rotura .... 104
Figura 3.41 Muestreo del oxígeno disuelto disuelto .....	Figura 3.42 Muestreo del oxígeno disuelto ..... 104
Figura 3.43 Esquema que se lleva a cabo con cada actuación.....	106
Figura 3.44 Concentración de oxígeno disuelto y ácido sulfhídrico sin inyección de aire en Playa Honda IA.....	109
Figura 3.45 Concentración de oxígeno disuelto y ácido sulfhídrico con inyección de aire en Playa Honda IA.....	109
Figura 3.46 Concentración de oxígeno disuelto y ácido sulfhídrico sin inyección de aire en Playa Honda IB.....	110
Figura 3.47 Concentración de oxígeno disuelto y ácido sulfhídrico con inyección de aire en Playa Honda IB.....	110
Figura 3.48 Concentración de oxígeno disuelto y ácido sulfhídrico sin inyección de aire en Playa Honda II.....	111
Figura 3.49 Concentración de oxígeno disuelto y ácido sulfhídrico con inyección de aire en Playa Honda II.....	111
Figura 3.50 Concentración de oxígeno disuelto y ácido sulfhídrico sin inyección de aire en Mar de Cristal.....	112
Figura 3.51 Concentración de oxígeno disuelto y ácido sulfhídrico con inyección de aire en Mar de Cristal.....	112
Figura 3.52 Concentración de oxígeno disuelto y ácido sulfhídrico sin inyección de aire en Playa Paraíso .....	113
Figura 3.53 Concentración de oxígeno disuelto y ácido sulfhídrico con inyección de aire en Playa Paraíso.....	113

## RESUMEN

---

Durante el transporte del agua residual a lo largo de las redes de saneamiento se generan malos olores debido a la descomposición de la materia orgánica llevada a cabo por bacterias sulfato-reductoras, que proliferan en aguas con una concentración menor de 1 mg/L de oxígeno disuelto causando la generación de sulfuros y su posterior liberación a la atmósfera como ácido sulfhídrico, principal responsable de los malos olores y de la corrosión de la red de alcantarillado.

Con el fin de evitar la aparición de dichas condiciones anaerobias, se propone estudiar la oxigenación del agua residual y la prevención de la formación de sulfuros mediante diferentes métodos. Por ello se han realizado dos ensayos a escala reducida en el laboratorio Municipal de Cartagena, en los que se ha simulado la oxigenación de muestras bien mediante la inyección de aire en el agua residual y la renovación del aire de la atmósfera de la red de alcantarillado midiendo su evolución en cuanto a oxígeno disuelto, sulfuros disueltos y ácido sulfhídrico liberado a la atmósfera se refiere. Por otro lado se realizó un tercer ensayo en campo basado en la inyección de aire en agua residual a escala real en conducciones en presión.

El primer ensayo se realizó con muestras de agua residual procedentes de la entrada a la depuradora de “Cabezo Beaza” en Cartagena y de la EBAR “Las Gaviotas” situada en La Manga durante la temporada de invierno-primavera 2011, a estas muestras se les aplicó una inyección de aire durante 10 minutos, para poder determinar la eficiencia del oxígeno que se transfiere al agua, así como el tiempo en que se mantiene éste disuelto. Se comprobó además como la aplicación de aire hace que se eliminen prácticamente todos los sulfuros disueltos presentes en la muestra de agua residual y que se liberen en forma de ácido sulfhídrico, trasladando a la atmósfera este gas, completando el estudio con la medida de la concentración del sulfhídrico liberado con cada caudal de aire. Se concluye que un caudal de aire de 0,44 L/min por cada litro de agua residual es suficiente para aumentar la concentración

de oxígeno disuelto en la muestra a 1 mg/L, permaneciendo el agua en condiciones aerobias durante al menos media hora tras su aplicación.

En el segundo ensayo se trabajó con muestras procedentes de la EBAR "Las Gaviotas" durante la temporada primavera-verano 2012. Se llevó a cabo un tratamiento de ventilación basado en la renovación del aire que se encuentra en contacto con el agua residual, para lo cual se aplicaron diferentes caudales de ventilación de aire de la atmósfera del envase que contenía la muestra, que se encontraba en continua agitación durante una hora, realizándose a la vez la medida del contenido en ácido sulfhídrico que se va liberando, así como el contenido en sulfuros disueltos, otros compuestos de estado intermedio de oxidación como son los sulfitos y tiosulfatos y compuestos oxidados como los sulfatos. Los resultados revelan como con una tasa de 16 renovaciones a la hora se consigue la eliminación de los sulfuros disueltos en colectores de saneamiento que se encuentran ocupados por un 25% de agua y un 75% de aire.

El tercer ensayo se realizó en 5 localizaciones, ubicadas en Alumbres, Mar de Cristal, Playa Honda y Playa Paraíso, donde se inyectó aire comprimido sobre las tuberías de impulsión de estas localizaciones, siendo medidos de manera continua el oxígeno disuelto en el agua y el ácido sulfhídrico en el aire, éstas medidas se complementaron con otras puntuales con objeto de conocer los sulfuros disueltos. Los resultados del ensayo indican que para conseguir que la concentración de oxígeno disuelto alcance los 4 mg/L, la tasa de oxígeno inyectado frente al consumido por la superficie de cada colector de impulsión tiene que ser de 1,5 kg/h m<sup>2</sup>, dicha concentración de oxígeno inhibe la generación de sulfuros, consiguiendo unas condiciones aerobias además de oxidar a los sulfuros disueltos que se encontraban inicialmente en el agua.

## **Capítulo 1. INTRODUCCIÓN. CARACTERIZACIÓN Y ESTUDIO DE LOS SULFUROS EN AGUAS RESIDUALES**

---

### **1.1. Características generales de un agua residual urbana**

Las características y caudal del agua residual varían en función de si su origen es doméstico (urbano o rural), industrial o mixto, y dentro de cada uno de estos tipos varía en función del tamaño de la comunidad o ciudad, del tipo de industria, de la época del año y de la proporción de agua doméstica e industrial respectivamente.

Las alteraciones que sufre el agua como consecuencia del uso doméstico, debido al aporte de sustancias de diversa naturaleza, son físicas, químicas y biológicas.

Las alteraciones físicas influyen sobre el aspecto del agua, y afectan fundamentalmente al contenido de sólidos, a la turbidez, al color y al olor.

Las alteraciones químicas del agua son consecuencia del aporte de sustancias, solubles e insolubles, algunas de las cuales pueden reaccionar con los componentes naturales del agua potable, produciendo precipitaciones que se traducen en sólidos decantables o en suspensión, e incluso gases.

Las alteraciones biológicas del agua son consecuencia tanto del uso humano como de los contaminantes en la red de alcantarillado. Entre los microorganismos que aparecen en las aguas residuales sin tratar se incluyen algas, bacterias, protozoos, helmintos, virus, etc.

La cuantificación de las alteraciones del agua, y por tanto su grado de contaminación, se mide mediante técnicas analíticas de laboratorio. Más que un análisis completo de todas las sustancias que contiene un agua residual, de difícil realización, se mide un conjunto de parámetros físico-químicos y biológicos, de rápida y fácil determinación, cuyos valores permiten establecer el grado de alteración física, química y biológica del agua residual y, por tanto, el tipo de tratamiento a que se debe someter en función del destino del agua depurada.

Así, las alteraciones físicas más importantes se establecen mediante parámetros tales como sólidos totales, entre los que es necesario diferenciar entre sólidos disueltos y sólidos en suspensión.

Las alteraciones de tipo químico quedan cuantificadas analíticamente mediante parámetros que reflejan el contenido mineral (inorgánico) y el orgánico. El contenido en sustancias minerales queda reflejado por parámetros globales tales como la conductividad eléctrica, pH, alcalinidad, dureza, etc, o de forma más específica como aniones y cationes concretos, así como metales pesados.

El contenido en materia orgánica se mide mediante técnicas de oxidación química o biológica. Las técnicas de demanda de oxígeno son las más conocidas, (Demanda Química de Oxígeno, DQO, y Demanda Bioquímica de Oxígeno, DBO), asociadas al contenido en materia orgánica biodegradable, si bien se está utilizando cada vez más la medida del Carbono Orgánico Total, TOC, en sustitución de los anteriores.

Las alteraciones biológicas del agua tienen un gran interés sanitario y los parámetros de medida son muy variados, e incluyen indicadores y tipos específicos de microorganismos. Las bacterias actúan generalmente sobre la materia orgánica contenida en el agua residual, en presencia o en ausencia de oxígeno, para transformarla en otras sustancias de menor peso molecular, entre los que aparecen diversos gases. La concentración y tipo de microorganismos depende, entre otras razones, de la procedencia del agua residual y de las condiciones ambientales.

En la Tabla 1.1 (Metcalf & Eddy, 1995) se da la composición característica de las aguas residuales urbanas, con indicación de las concentraciones medias y los intervalos en que suelen oscilar.

Todas las unidades en mg/L menos los sólidos sedimentales.

CONSTITUYENTE	CONCENTRACION		
	FUERTE	MEDIA	DEBIL
SÓLIDOS TOTALES	1200	720	350
Disueltos SD	850	500	250
SD fijos SDF	525	300	145
SD volátiles SDV	325	200	105
En suspensión SS	350	220	100
SS fijos SSF	75	55	20
SS volátiles SSV	275	165	80
SÓLIDOS SEDIMENTABLES ml/L	20	10	5
DBO5	400	220	110
COT	290	160	80
DQO	1000	500	250
NITROGENO (Total como N)	85	40	20
Orgánico	35	15	8
Amoniaco libre	50	25	12
Nitritos	0	0	0
Nitratos	0	0	0
FOSFORO (Total como P)	15	8	4
Orgánico	5	3	1
Inorgánico	10	5	3
CLORUROS	100	50	30
ALCALINIDAD (como Co3Ca)	200	100	50
GRASA	150	100	50

Tabla 1.1 Composición característica de las aguas residuales

## 1.2. Influencia del oxígeno en la generación de sulfuros

En los sistemas de transporte de agua residual que circulan por gravedad tiene lugar la aireación del agua que puede ser lenta en el caso de grandes colectores debido a la suave pendiente y a la profundidad del flujo de agua que los caracteriza, mientras que en tuberías más pequeñas ésta tasa aumenta, en los sistemas de conducciones en presión éste fenómeno no ocurre por lo que el oxígeno presente se consume en un tiempo menor y se produce una mayor generación de sulfuros.

El oxígeno se consume por los microorganismos tanto en la masa de agua como en el biofilm de las tuberías, la tasa de consumo de oxígeno puede variar de acuerdo con la distancia que tiene que recorrer el agua residual debido a la difusión en la película biológicamente activa o biofilm de la pared de las tuberías.

El biofilm se encuentra formado por un entramado de organismos filamentosos y material gelatinoso donde se incorporan las bacterias, el espesor del biofilm

normalmente es de 0,3 a 1 mm, éste espesor dependerá de la velocidad y del contenido abrasivo en el agua residual, junto con otras condiciones ambientales.

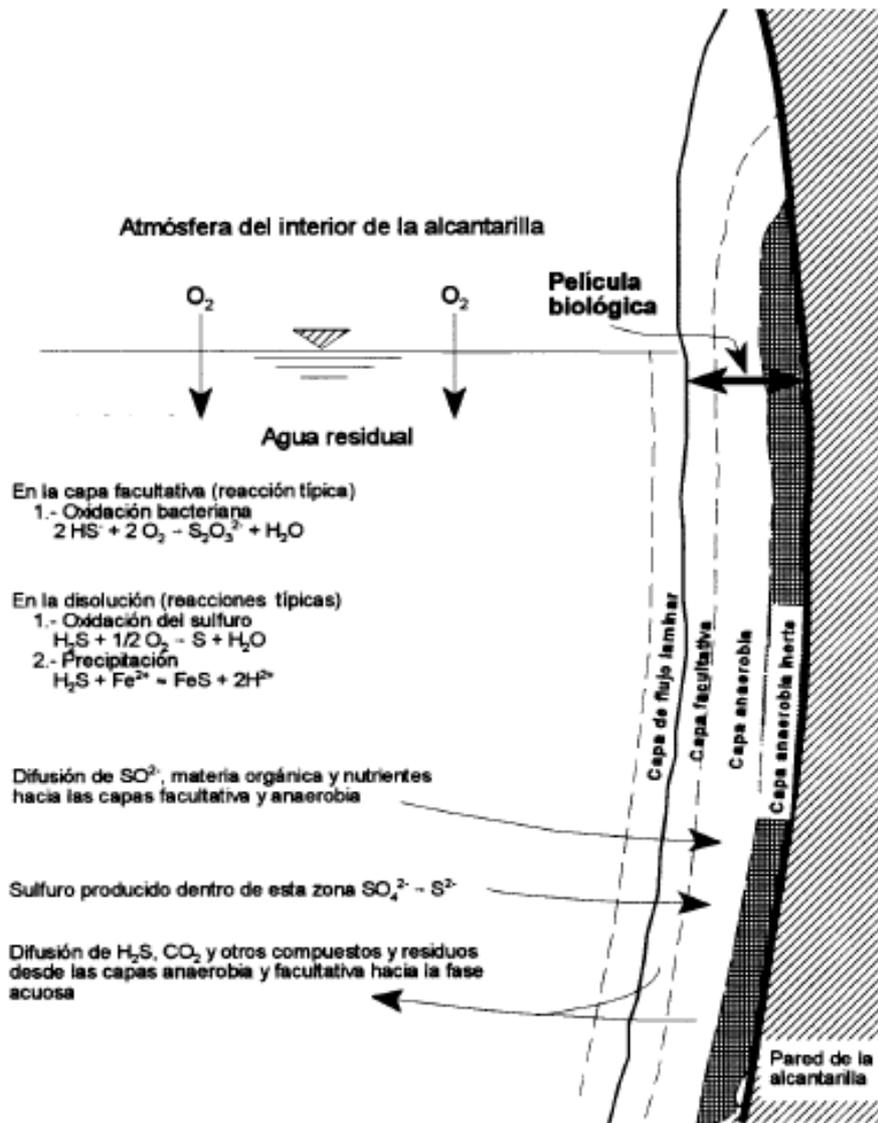


Figura 1.1 Estructura del biofilm en las tuberías

La estructura del biofilm se encuentra formada por varias capas, encontrando una zona aerobia y otra anaerobia, si prevalece la primera entonces se dan las condiciones para que ocurra la reducción de sulfatos. Esta situación se muestra en la figura 1.1 (Manufacturing Chemists Association, 1968).

La relación de la zona anaerobia con la aerobia está delimitada por la concentración de oxígeno en el agua residual así como por la temperatura y concentración de

materia orgánica. Si la concentración de oxígeno en la corriente es cercana a cero, entonces no se podrá oxidar todo el sulfuro y éste pasará a la corriente, esta situación también se muestra en la figura 1.1 (Manufacturing Chemists Association, 1968).

La mayor parte de la reducción de sulfatos en las tuberías ocurre en la capa de biofilm de la tubería o en los sedimentos depositados (Process Design Manual for Sulfide Control in Sanitary Sewerage Systems, 1978) y cuando el sulfuro producido en el biofilm se difunde a la corriente de agua residual conteniendo ésta oxígeno disuelto, los sulfuros podrán ser oxidados químicamente o bioquímicamente.

Estudios realizados por otros autores revelan que las muestras de agua residual recogidas de pequeñas tuberías muestran unas tasas de consumo de oxígeno relativamente bajas, del orden de 2-3 mg/Lh, mientras que en grandes colectores la tasa de oxígeno consumido es mayor del orden de 5-10 mg/L (Process Design Manual for Sulfide Control in Sanitary Sewerage Systems, 1974), estas tasas de consumo son muy variables ya que dependen de numerosos factores, encontrándose incluso que en situaciones en las que el agua residual se encuentra retenida o se mueve a baja velocidad se pueden dar condiciones anaeróbicas en la capa en contacto con el agua a pesar de que la concentración de oxígeno en la corriente sea de varios mg/L,

Cuando el único mecanismo de aporte de oxígeno es la aireación de la superficie del agua, la tasa de consumo estará limitada por el oxígeno aportado mediante este fenómeno (Process Design Manual for Sulfide Control in Sanitary Sewerage Systems., 1974).

Estas condiciones hacen necesario que se defina el contenido de oxígeno disuelto en el agua residual para delimitar las condiciones de anoxia en las que se puede producir el ácido sulfhídrico, así como la transferencia de éste a la atmósfera. Según el Servicio de Protección del Medio Ambiente de los Estados Unidos, USEPA (1974), cuando la concentración de oxígeno disuelto en el agua residual es mayor de 0,2-0,5 mg/L, no suelen haber sulfuros presentes.

### 1.3. Estudio de los sulfuros en el agua residual

En condiciones aerobias, deseables, el oxígeno es consumido en su mayor parte por los organismos heterótrofos. Estos oxidan la materia orgánica, medida mediante la demanda biológica de oxígeno (DBO), y producen energía para reproducirse y de este modo formar biomasa. Bajo condiciones anóxicas los organismos heterótrofos activos producen la reducción de los nitratos empleando éstos como base de su respiración, ya que no existe oxígeno. A continuación y ante la falta también de nitratos, se produce, por este orden, la reducción de los sulfatos a otros compuestos entre los cuales se encuentra el ácido sulfhídrico. Por este motivo resulta de gran interés conocer el ciclo del azufre para así poder tener un mejor control de la generación y comportamiento de los compuestos responsables de la formación de malos olores.

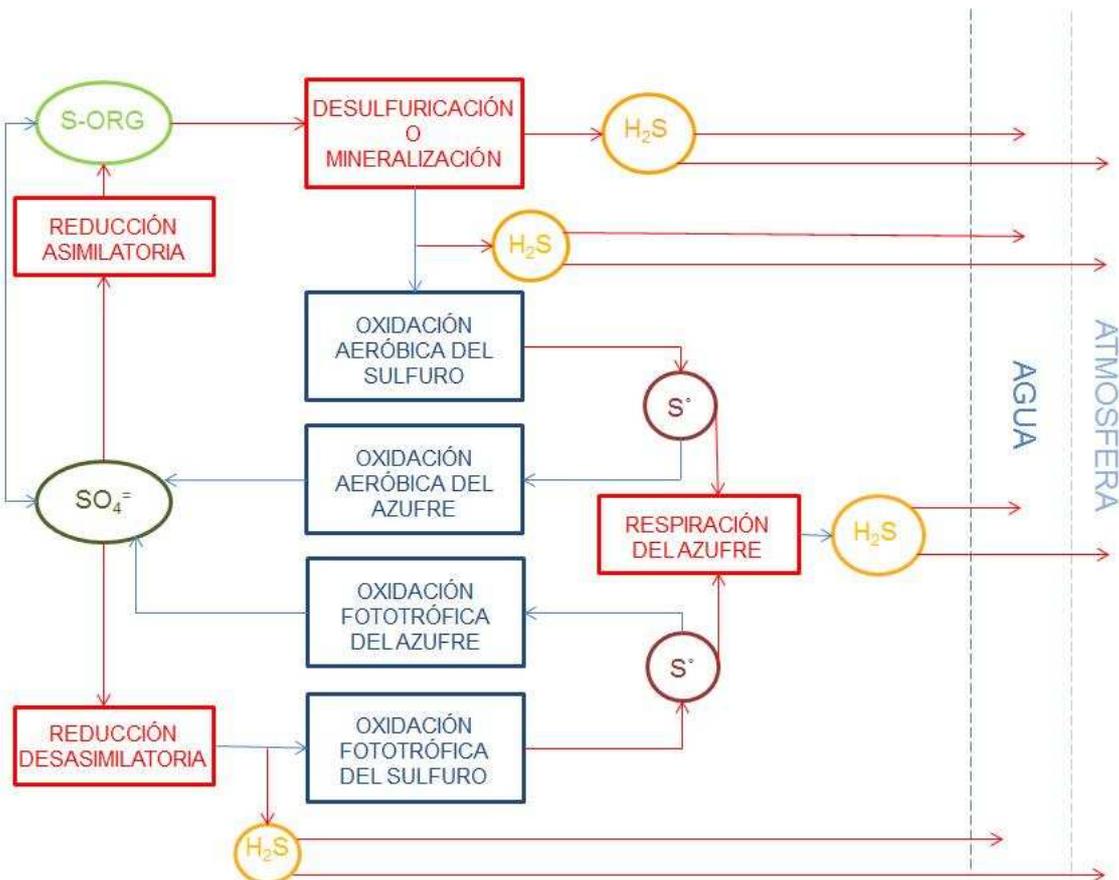


Figura 1.2 Ciclo del azufre

En cuanto a la disponibilidad de sulfatos que potencialmente se pueden reducir, al enmarcarse en la Región de Murcia este estudio, la procedencia de las aguas en su mayoría es de la potabilización del Trasvase Tajo-Segura, por lo que poseen un alto contenido en sulfatos que estarán disponibles para que en una situación de anaerobiosis se formen los mencionados compuestos reducidos del azufre, sabiendo que la concentración de los sulfatos en el agua varía en un amplísimo rango, pudiéndose encontrar concentraciones de unos pocos hasta cientos de mg/L (Drinking Water and Health, 1977) y sabiendo además que todos los compuestos del azufre en las formas oxidadas y reducidas, orgánicas o inorgánicas, representan una potencial producción de sulfuros (Sawyer, 1967).

Las reacciones características de los sulfuros que se dan en las aguas residuales se muestran en la siguiente tabla.

REACCIONES	
REDUCCIÓN	OXIDACIÓN
$SO_4^{2-} + 4 H_2 + H^+ \rightarrow HS^- + 4 H_2O$	$H_2S + \frac{1}{2} O_2 \rightarrow S^0 + H_2O$
$SO_4^{2-} + CH_3COO^- + 3 H^+ \rightarrow H_2S + 2 CO_2 + 2 H_2O$	$H_2S + 2 O_2 \rightarrow SO_4^{2-} + 2 H^+$
$CH_3COO^- + H^+ + 2 H_2O + 4 S^0 \rightarrow 2 CO_2 + 4 H_2S$	$S^0 + H_2O + \frac{1}{2} O_2 \rightarrow SO_4^{2-} + 2 H^+$
	$S_2O_3^{2-} + H_2O + 2 O_2 \rightarrow 2 SO_4^{2-} + 2 H^+$
	$HS^- + 2 O_2 \rightarrow S_2O_3^{2-} + H_2O$
	$2 HS^- + O_2 \rightarrow 2 S + 2 OH^-$
	$H_2S + 2 O_2 \rightarrow H_2SO_4$

Tabla 1.2 Reacciones características de oxidación-reducción de compuestos del azufre en aguas residuales.

Entre las bacterias sulfato-reductoras, principales responsables de la reducción de los sulfatos a sulfuros, destaca el género *Desulfovibrio* que se encuentra normalmente presente en todas las aguas residuales domésticas, ésta realiza la oxidación bioquímica de la materia orgánica utilizando el oxígeno combinado con el azufre como

aceptor final de hidrógeno, como se puede observar en las reacciones de reducción que se muestran en la tabla 1.2.

Varios investigadores han descrito que las bacterias sulfato-reductoras pueden usar los sulfatos y la materia orgánica en un ratio aproximado de 2:1 dependiendo de la naturaleza de los compuestos orgánicos, aunque es improbable que ambos se difundiesen en las proporciones ideales a la zona sulfato-reductora (Pomeroy, R. Thistlethwayte, 1946).

Es importante conocer la permanencia del ácido sulfhídrico en el agua residual, es decir su solubilidad, ya que dicha sustancia provocará, una vez pase a la atmósfera, los citados problemas de olores que se quieren corregir.

El ácido sulfhídrico es moderadamente soluble en agua, encontrándose en un rango comprendido entre 3 y 4 g/L a temperaturas a las que normalmente se encuentra el agua residual, la solubilidad del ácido sulfhídrico disminuye con el incremento de la temperatura (Piscarczyk, K., 1982). Se trata de un compuesto muy volátil que con una simple agitación del agua residual la abandona con facilidad y pasa a la atmósfera. La solubilidad variará en función del pH y de la temperatura, parámetros que hay que tener muy en cuenta ya que influyen también en la presencia de oxígeno en el agua residual. A continuación se muestra la tabla 1.3, que reúne los valores de máxima solubilidad a la presión de 1 atmósfera del H<sub>2</sub>S en el agua a diferentes temperaturas.

Temperatura (°C)	Fracción molar	g/L
15	0,002335	4,4117
20	0,002075	3,9214
25	0,00185	3,4969
30	0,00166	3,1383
35	0,00151	2,8550

Tabla 1.3 solubilidad de H<sub>2</sub>S en el agua a diferentes temperaturas a la presión de 1 atmósfera. Handbook of chemistry and physics

Además en situación de equilibrio se puede relacionar la cantidad del gas (ácido sulfhídrico) que hay disuelto en el agua residual con la cantidad de este presente en la

atmósfera, esta relación obedece a la Ley de Henry y establece que la cantidad de un gas ligeramente soluble disuelto en un líquido es proporcional a la presión parcial del gas. Cuando se rompe este equilibrio puede haber una transferencia del gas disuelto entre la fase líquida y la atmósfera, por ejemplo al provocar una agitación en el agua se rompe el equilibrio entre ambas fases, de manera que se facilita la salida del gas a la atmósfera.

Las unidades de la constante de la Ley de Henry se expresan de diversas formas, según su uso las fórmulas serán ligeramente diferentes, siendo la idea y la utilidad de la ley de Henry la misma. La forma más común de la ecuación de la ley de Henry, en el campo de control de la contaminación del aire es la siguiente:

$$K = \frac{P}{x} \quad \text{Ecuación 1.1}$$

Dónde:

K= Constante de Henry (atmósferas)

P= Presión parcial de la fase gas sobre la solución (atmósferas)

x= Fracción molar del gas disuelto en la fase líquida (adimensional)

Esta ecuación es válida para soluciones diluidas, donde la transferencia de masa se encuentra en equilibrio entre la fase líquida y gaseosa. Los valores de la constante de Henry para el H<sub>2</sub>S se expresan en la tabla 1.4.

Temperatura °C	K Henry (H <sub>2</sub> S) atm
0	268
10	367
20	483
25	545
30	609
35	676
40	745
45	813

Tabla 1.4 Constante de Henry en Atmosferas, para presiones bajas, Mills 1995.

Como se mencionó, partiendo de los valores de la constante de Henry se puede relacionar la cantidad de ácido sulfhídrico disuelto en el agua residual con la concentración del gas en la atmósfera, por ejemplo si se toma una concentración de 2,5 mg/L de ácido sulfhídrico disuelto en el agua residual, medida que se ha encontrado en este estudio en múltiples ocasiones, se puede determinar la concentración del gas con la que se encuentra en equilibrio en la atmósfera.

Transformados los 2,5 mg/L de ácido sulfhídrico disuelto a fracción molar se tiene un valor de  $1,33E^{-06}$  (adimensional).

De la tabla 1.4 se tiene que para una temperatura de 25°C la constante de Henry será 545 atm, al aplicar la ecuación 1.1 se obtiene la siguiente ecuación:

$$P = K \times X = 545 \times 1,33E^{-06} = 7,25E^{-04} \text{ atm} \quad \text{Ecuación 1.2}$$

Este valor se puede transformar a ppm resultando para estas condiciones 725 ppm de ácido sulfhídrico gas en la atmósfera.

En la publicación de la EPA de octubre de 1985 se puede ver esta relación que se muestra en la figura 1.3

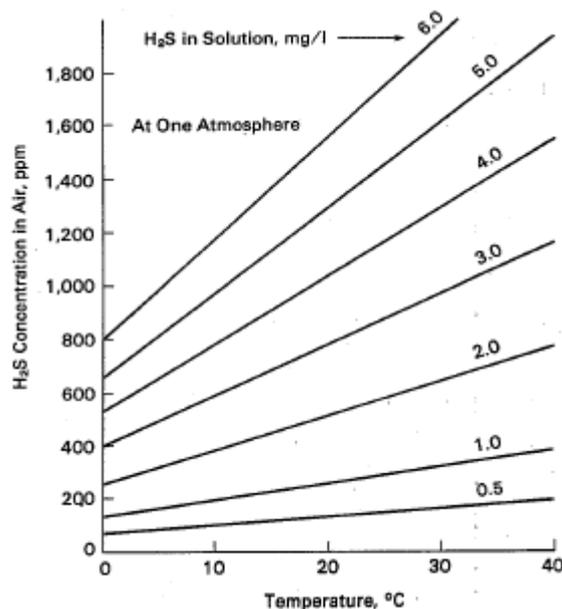


Figura 1.3 Equilibrio de la concentración H<sub>2</sub>S en aire, EPA 1985.

Otro ejemplo de la ley de Henry, es la aplicación de la misma para determinar la máxima solubilidad del aire en el agua. Para ello se necesitan conocer los valores de la constante de Henry para el aire que se presentan en la tabla 1.5.

Temperatura °C	K Henry (Aire) atm
17	62626
27	74747
37	84848
47	92929
57	100000
67	105051

Tabla 1.5 Constante de Henry en Atmósferas, para presiones bajas, Mills 1995.

En este caso se calcula la fracción molar del aire disuelto en el agua para una temperatura de 17°C y una presión atmosférica de 1 atm. Tanto el aire como el vapor de agua son gases ideales, además al ser el aire un gas poco soluble en agua puede aplicarse la Ley de Henry que para las condiciones citadas será  $K = 62626$  atm.

La presión parcial del vapor de agua en el aire será la presión de saturación del agua a 17°C es  $P_v = 0,02$  atm.

Por lo que la presión parcial de aire seco será:

$$P_{\text{aire seco}} = P - P_{\text{vapor}} = 1 - 0,02 = 0,98 \text{ atm} \quad \text{Ecuación 1.3}$$

Donde:

$P_{\text{aire seco}}$  = presión parcial del aire seco (atm)

$P$  = presión total de la solución (atm)

$P_v$  = presión de vapor del agua (atm)

La fracción molar del aire en el agua será:

$$X_{\text{aire seco (lado del líquido)}} = P_{\text{aire seco (lado del gas)}} / K \quad \text{Ecuación 1.4}$$

$$X_{\text{aire seco (lado del líquido)}} = 0,98 / 62626 = 1,6 \times 10^{-5}$$

Donde:

X= Concentración del gas en el líquido (fracción molar)

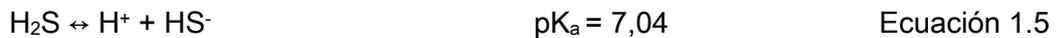
P= Presión parcial del gas sobre el líquido (atm)

K= Constante de Henry para un determinado gas (atm)

La concentración de aire en el agua es de 1,6 moles por cada 100000 moles de solución, este resultado se puede expresar también en mg/L, mediante las correspondientes transformaciones estequiométricas dando como resultado 25 mg/L.

Por otro lado es interesante conocer la composición que los distintos compuestos reducidos del azufre correspondientes con las especies  $H_2S$ ,  $HS^-$  y  $S^{=}$  que puede haber en un agua, la proporción en la que se encuentren variará en función del pH y la temperatura.

Las siguientes ecuaciones muestran a las especies en solución que se producen a partir de la disociación del  $H_2S$  en el agua, se incluyen también los valores de las constantes de disociación.



Las ecuaciones de Henderson-Hasselbach, 1.7 y 1.8, describen la relación de equilibrio entre especies azufradas para un determinado valor de pH.

$$pH = pK_a + \log \frac{[HS^-]}{[H_2S]} \quad 1^a \text{ disociación} \quad \text{Ecuación 1.7}$$

$$pH = pK_a + \log \frac{[S^{=}]}{[HS^-]} \quad 2^a \text{ disociación} \quad \text{Ecuación 1.8}$$

Se presenta a continuación un ejemplo en el que se toma un valor promedio de pH de 7,5, valor que se encuentra frecuentemente en las muestras de este estudio, establecido el valor de pH y considerando una situación de equilibrio entre el  $H_2S$  que se encuentra en la atmósfera y el que se encuentra disuelto en el agua, se pretende

calcular la concentración de las especies  $H_2S$ ,  $HS^-$  y  $S^{=}$  disueltas si se varía la concentración de  $H_2S$  gas con el que se encuentran en equilibrio. Al sustituir los valores de pKa para ambas disociaciones pueden obtenerse los valores de concentración de compuestos azufrados para un pH dado, por ejemplo utilizando valores de pKa y de concentración de  $H_2S_{(l)}$ , las ecuaciones 1.7 y 1.8 se transforman en:

$$[HS^-] = (10^{pH-7,04}) * [H_2S] \text{ g-mol } HS^-_{(l)} / m^3 \quad \text{Ecuación 1.9}$$

$$[S^{=}] = (10^{pH-11,96}) * [HS^-] \text{ g-mol } HS^-_{(l)} / m^3 \quad \text{Ecuación 1.10}$$

Sustituyendo el valor del pH = 7,5 a una temperatura de 25°C y una presión de 1 atm se obtienen los resultados que se presentan en la tabla 1.6.

$H_2S_{(g)}$ (ppm)	$H_2S_{(g)}$ (g/L)	$H_2S_{(l)}$ (g/L)	$HS^-_{(l)}$ (g/L)	$S^{=}_{(l)}$ (g/L)
10	0,01	3,40E-08	9,51E-08	3,20E-12
100	0,14	3,40E-04	9,51E-04	3,20E-08
500	0,70	1,70E-03	4,76E-03	1,60E-07
1000	1,39	3,40E-03	9,51E-03	3,20E-07

Tabla 1.6 Valores de  $H_2S$ ,  $HS^-$  y  $S^{=}$  disueltos en equilibrio con diferentes concentraciones de  $H_2S$  gas

Los valores de  $H_2S$ ,  $HS^-$  y  $S^{=}$  siguen una determinada proporción, en la publicación de la EPA de octubre de 1985, se puede ver esta relación, se muestra en la figura 1.4.

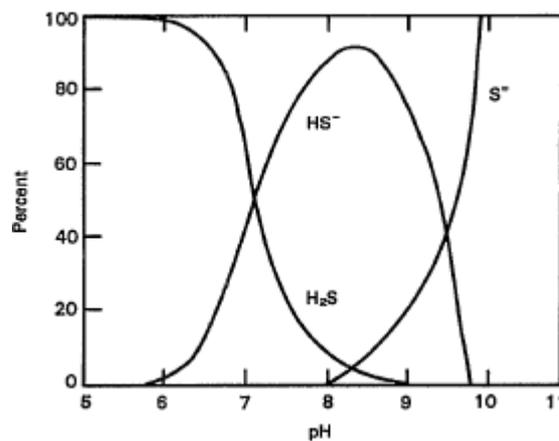


Figura 1.4 Composición de  $H_2S$ ,  $HS^-$  y  $S^{=}$  disueltos en equilibrio a diferentes valores de pH

Los valores de  $H_2S$ ,  $HS^-$  y  $S^{=}$  disueltos en el agua residual se encuentran siempre en equilibrio, de forma que al eliminarse  $H_2S$  mediante agitación o aireación, el equilibrio

vuelve a desplazarse para encontrarse en la misma proporción, para ello los compuestos reducidos en forma de  $\text{HS}^-$  pasarán a formar otra vez  $\text{H}_2\text{S}$ . Por ejemplo a un pH de 7,5 y una temperatura de  $25^\circ\text{C}$ , las concentraciones de  $\text{H}_2\text{S}$  y  $\text{HS}^-$  siempre serán del 24 y 76% respectivamente, mientras que la concentración de  $\text{S}^{2-}$  se considera despreciable al tener valores tan bajos como los anteriormente expuestos, esta relación se muestra en la gráfica 1.5 que pertenece a la publicación de la EPA de octubre de 1985.

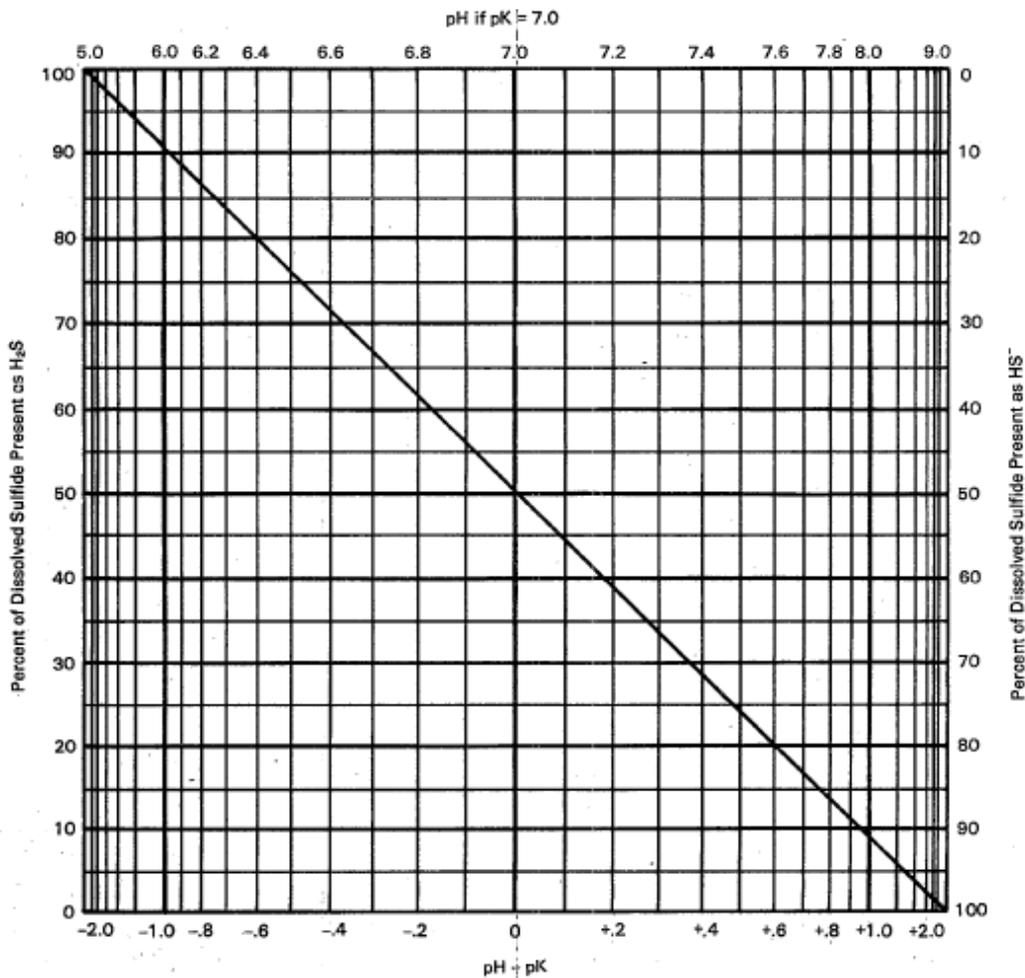


Figura 1.5 Composición de  $\text{H}_2\text{S}$  y  $\text{HS}^-$  disueltos en equilibrio a diferentes valores de pH

Uno de los aspectos claves de este proyecto es la cuantificación de las medidas de los compuestos reducidos del azufre, estos compuestos los podemos encontrar nombrados como sulfuros totales dentro de los cuales se encuentran los sulfuros metálicos solubles en ácido (los sulfuros de cobre y plata son insolubles y se ignoran a efectos prácticos),  $\text{H}_2\text{S}$  y  $\text{HS}^-$ , siendo despreciable  $\text{S}^{2-}$  ya que supone menos del 0,05% a pH inferiores a 11. También se nombran como sulfuros disueltos englobando este

término a los compuestos  $H_2S$  y  $HS^-$ , lo que ocurre tras haber eliminado los sólidos suspendidos.

Para determinar la concentración de sulfuros, encontramos diferentes métodos como son el método iónico, iodométrico y azul de metilo, este último es el método empleado en nuestras determinaciones en el laboratorio

#### **1.4. Estudio de la aireación en conducciones de agua**

La presencia de oxígeno disuelto en cantidades superiores a 1mg/L en el agua residual es suficiente para prevenir la generación de sulfuros y los sulfuros que proceden de los fangos y del biofilm se oxidan a tiosulfatos.

Existen diferentes técnicas que mejoran el balance de oxígeno en el transporte de agua residual, como la inyección de aire y el mantenimiento de las instalaciones.

##### **1.4.1. Inyección de aire en tuberías de impulsión**

La inyección de aire en el agua residual mejora el balance de oxígeno en los sistemas de conducción, ya que se consigue en el agua el oxígeno necesario para prevenir o reducir significativamente la generación de sulfuros y permitir que se produzca la oxidación bioquímica de los sulfuros disueltos existentes.

Existen diferentes métodos para la inyección de aire entre los que se encuentran la inyección directa y compresión de aire en la tubería a presión y otros métodos como aspiradores venturi, tubos en U o tanques de aireación.

La inyección directa de aire comprimido en las tuberías de impulsión ha sido practicada ampliamente. Incrementando la presión en las tuberías de impulsión se consiguen grandes cantidades de oxígeno disuelto en el flujo. A presión atmosférica y

21°C, el agua tendrá disuelto aproximadamente el 2% en aire de su volumen, este aumenta al 4% a 103 Kpa y al 6% a 207 Kpa.

La inyección directa de aire comprimido en tuberías de impulsión ha sido estudiada en California (Pomeroy, R.D., J.D. Parkhurst, 1985), Texas (Sewell, R.J., 1975; Laughlin, J.A., 1964), Louisiana (Condon, R.L., R.A. Cooper., 1975), New Jersey (Vivona, M.A., 1982) y más recientemente en Japón (Takatoshi, O., 1998; Tanaka, N., 1995; Kameda, Y., Morita, T. 1990) y España (Delgado, S.,M. Álvarez., 1999).

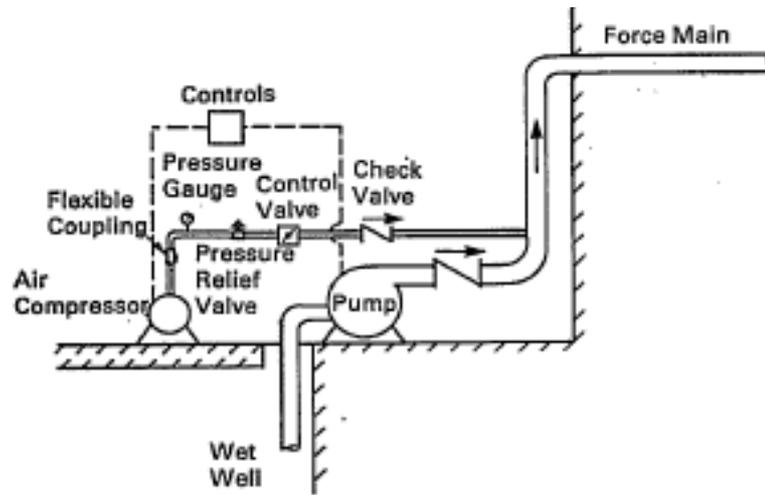


Figura 1.6 Inyección directa de aire comprimido

La cantidad de aire requerida varía dependiendo de las características del agua residual (tasa de consumo de oxígeno), el tiempo de retención en la tubería, la temperatura, la presión del sistema, el perfil hidráulico de la tubería de impulsión y el grado de control de sulfuros deseados (Sewell, R.J., 1975; Laughlin, J.A., 1964).

La proporción que se recomienda es una tasa de aire de 0,75-2,25 m<sup>3</sup> de aire por m<sup>3</sup> de agua residual o bien 0,7-1,3 m<sup>3</sup>/h/cm de diámetro de tubería.

Diam.	Length	Air Input	Total Sulfide	
			Pump Station	Discharge of Force Main
cm	m	m <sup>3</sup> /d	mg/l	
25	525	0		16.4
		53.0		12.4
		61.2		14.8
		61.2		12.9
		61.2	Avg.	12.3
		61.2	2.1	3.4
		65.2		3.2
		73.4		8.0
		77.5		7.5
		81.6		4.5
30	455	0		4.6
		139	Avg.	0.2
		171	0.7	0.2
30	600	0		5.7
		57.1		5.6
		89.7		3.8
		110	Avg.	1.9
		163	0.5	3.5
		428		0.25
		428		0.2
		428		0.25
Port Arthur, TX (2)				
41	1,170	0		2.3
		489		0.7
		979		2.1
		1,350	Avg.	2.7
		1,470	1.4	0.6
		1,960		0.3
		2,450		0.1
		2,690		1.5
		4,078		0.1
76	1,340	0	Avg.	5.6
		4,490	2.3	1.4
Trinity River Authority, TX (5)				
76	1,550	0	Range	5 to 8
		3,260	0 to 3	<0.3
Sacramento, CA (7)				
60	1,700	0		0.45
		410	Avg.	0.39
		560	0.3	0.26
		860 to 920		0.19

Tabla 1.8 Valores obtenidos en experiencias de inyección directa de aire a presión

### 1.4.2. Aireación en tuberías de gravedad

El oxígeno que se consigue mediante la aireación de la superficie del agua residual a lo largo del sistema de conducción se va perdiendo debido al consumo que llevan a cabo los microorganismos presentes en el agua y en el biofilm durante la oxidación bioquímica de la materia orgánica.

La tasa de aireación se utiliza para dar información del cambio en la concentración de oxígeno del agua residual que se da al absorberlo de la atmósfera, esta tasa viene dada por la ecuación 1.11. Pomeroy y Parkhurst encontraron que la corriente de agua residual que fluye en una alcantarilla parcialmente llena, tiene un coeficiente de intercambio que se puede predecir por la ecuación que sigue (Parkhurst, J.D., 1972).

$$R_f = 0,96 C_A T (su)^{\frac{3}{8}} D (d_m)^{-1} \quad \text{Ecuación 1.11}$$

Dónde:

$R_f$ = Tasa de aireación, mg/Lh

0,96= Coeficiente empírico aplicable a la corriente de agua residual

$C_A$ = Factor de turbulencia

$T$ = Coeficiente de temperatura

$s$ = Pendiente m/m

$u$ = Velocidad de la corriente, m/s

$D$ = Deficit de oxígeno disuelto, mg/L

$d_m$ = Profundidad media hidráulica, m

Los resultados obtenidos en estudios desarrollados por los autores anteriormente citados demostraron que cuanto menor era el diámetro de la tubería mayor era la tasa de aireación debido a una menor profundidad del flujo de agua y que además cuanto mayor era la velocidad con la que fluía el agua al haber una turbulencia mayor la tasa de aireación aumentaba.

## Capítulo 2. MATERIALES Y MÉTODOS

---

El presente trabajo fin de Máster está compuesto por 3 ensayos, a continuación se describen los materiales y métodos que se han utilizado.

- **Metodología**

### **Primer ensayo**

En el primer ensayo las pruebas se han llevado a cabo en el laboratorio municipal de Cartagena, donde se ha realizado un tratamiento de inyección de aire sobre las muestras basado en la introducción de oxígeno en el agua residual, para conocer la eficacia de dicha inyección al introducir oxígeno en el agua residual y permanencia del oxígeno y del ácido sulfhídrico en el agua, evaluando de esta manera los efectos de la introducción de aire como tratamiento para oxidar los sulfuros disueltos y evitar la formación de sulfuros disueltos.

Para ello se ha partido de muestras de agua residual urbana bruta procedente de la entrada a la EDAR “Cabezo Beaza”, cada muestra se ha caracterizado a su llegada al laboratorio, estudiando parámetros como pH y conductividad eléctrica, después, en un plazo máximo de 2 días se analizó la Demanda Química de Oxígeno (DQO) y Demanda Biológica de Oxígeno (DBO<sub>5</sub>). Además se realizaron las determinaciones de nitrógeno total, sulfatos, sulfuros disueltos y sólidos en suspensión dentro de los 7 días desde la recepción de la muestra (a excepción del contenido en nitrógeno total y sulfuros disueltos, las demás son medidas certificadas).

En el ensayo una parte de la muestra, en adelante denominada submuestra, se introduce en un recipiente ocupando hasta el 80% del volumen del mismo, equivalente a 0,5 litros, mientras que el volumen restante, 20% del recipiente, quedaría ocupado por aire. Dicho recipiente es de cristal con una capacidad: 0,6 litros, peso de 235 gramos, diámetro de 88,80 mm y una altura de 119,90 mm.

Estas submuestras se encuentran a una temperatura comprendida entre 25 y 30°C, sobre ellas se aplican los procesos de agitación y de inyección de aire. En primer lugar se introduce un caudal determinado de aire mediante un compresor durante 10 minutos, terminando con una agitación. Para determinar la evolución de la muestra se realizan mediciones en continuo, con un registro de datos cada 5 minutos del oxígeno disuelto en el agua y del ácido sulfhídrico presente en la atmósfera del interior del recipiente que contiene la muestra. El equipo que compone el modelo se muestra en la siguiente figura 2.1.



Figura 2.1 Equipos del ensayo 1

En la Figura 2.1 se puede observar la submuestra contenida en el envase que está sometido a una agitación de 100 rpm y al que se encuentran conectados, un oxímetro que mide el contenido de oxígeno disuelto en el agua, un medidor de gases que mide la concentración de ácido sulfhídrico que se libera en el interior de la atmósfera del bote y un compresor que inyecta el aire para realizar el tratamiento.

### **Segundo ensayo:**

En el segundo ensayo las pruebas se han realizado en el laboratorio municipal de Cartagena, con la ejecución del mismo, se va a comprobar la eficiencia en la eliminación de los sulfuros disueltos en el agua residual mediante la renovación del aire que se encuentra en contacto con ella. Para llevar a cabo el ensayo se han utilizado muestras de agua residual urbana bruta procedente de la EBAR “Las Gaviotas” situada en La Manga del Mar Menor en el termino municipal de San Javier, estas aguas se caracterizan por tener altos contenidos de sulfatos y sulfuros disueltos. Los parámetros estudiados fueron compuestos de azufre como sulfuros disueltos, sulfatos, sulfitos, tiosulfatos y ácido sulfhídrico.

El material necesario para la realización del ensayo incluye recipientes de poliuretano de 1,5, 2, 3 y 5 L de volumen del cual el 75% estaba ocupado por aire (además de otros gases que se desprenden del agua) y el 25% por la muestra de agua, porcentajes típicos de los colectores de saneamiento por gravedad, que se mantuvo en continua agitación (100 rpm) durante 1 hora, además se incorporó, dependiendo del número de renovaciones por hora que se quisieran realizar, una sonda para la extracción para la ventilación del aire del interior de los recipientes, pudiendo escogerse entre los diámetros, 3, 4 y 5 mm. Las medidas de ácido sulfhídrico se tomaron cada minuto hasta completar una hora. El equipo que compone el modelo se puede ver en la figura 2.2.



Figura 2.2 Equipos del ensayo 2

En la figura 2.2 se puede observar la submuestra contenida en el envase que está sometido a una agitación de 100 rpm y al que se encuentra conectada una bomba de extracción que envía los gases extraídos al medidor de gases. Éste mide la concentración de ácido sulfhídrico que se libera del agua al interior de la atmósfera del recipiente.

### **Tercer ensayo:**

El tercer y último ensayo se ha realizado en 5 EBARs ubicadas en el Término Municipal de Cartagena. La finalidad del ensayo es verificar la eficiencia cómo se pueden oxidar los sulfuros disueltos en el agua residual que es transportada mediante tuberías de impulsión mediante la inyección de aire comprimido. Para llevar a cabo el ensayo se han tenido que realizar una serie de actuaciones en las EBARs de Alumbres, Mar de Cristal, Playa Honda y Playa Paraíso, donde se han instalado unos compresores que inyectan aire a presión en las tuberías de impulsión. Las medidas efectuadas se hicieron en los desagües libres de cada impulsión, donde se acondicionaron puntos para la medición de oxígeno disuelto en agua residual, tanto esta medida como la de ácido sulfhídrico en la atmósfera se realizaron de manera continua, midiéndose además los sulfuros disueltos de manera puntual. En la figura

2.3. se muestra un ejemplo de equipo compresor y punto de medición y en la figura 2.4. los equipos empleados para realizar las determinaciones del ensayo.



Figura 2.3 Equipo compresor y punto de medición del ensayo 3.



Figura 2.4 Equipos del ensayo 3

En la figura 2.4 se muestra el equipo de medición, compuesto por una sonda multiparamétrica (HI9828) y equipo de medición de gases (Dräger X-am 5000).

### Parámetros físico-químicos estudiados y métodos para su determinación:

-Determinación de sulfatos por espectrometría

El ión sulfato ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) precipita en un medio de ácido acético con acetato de bario formando cristales de sulfato de bario ( $\text{BaSO}_4$ ) homogéneos que se mantienen dispersos y cuya turbidez se mide por espectrofotometría, los resultados se expresan en mg/L de  $\text{SO}_4^{2-}$ . (Métodos USEPA para análisis de aguas, 4500-  $\text{SO}_4^{2-}$  E).

Esta medida se realizó en el segundo ensayo con un kit de determinación de sulfatos de la casa Chemetrics, denominado Test de sulfatos, con un rango de medida de 8,0 - 100,0 ppm basado en el método descrito, siendo necesario para la lectura la utilización

de un fotómetro. Las especificaciones técnicas del test vienen detalladas en el anexo IV.

-Determinación de sulfuros por colorimetría

La medida del contenido total de sulfuros solubles en ácido utiliza la metodología del azul de metileno, donde los sulfuros reaccionan con dimetil p-fenilendiamina en presencia de cloruro férrico para producir azul de metileno, las medidas realizadas se llevaron a cabo con un kit de determinación de sulfuros solubles de la casa Chemetrics, denominado Test de sulfuros disueltos con un rango de medida de 0-10 ppm, que se basa en los métodos USEPA para análisis de aguas y residuos (método 376.2). Las medidas vienen expresadas como mg/L de S<sup>=</sup>. Las especificaciones técnicas del test vienen detalladas en el anexo IV.

-Determinación de tiosulfatos por espectrometría

El método emplea el procedimiento yodométrico, aunque el sulfito en general se valora como tiosulfato, el reactivo se ha formulado para evitar las interferencias de altos niveles de sulfito. El tiosulfato se valora con yoduro-yodato en solución ácida utilizando como indicador almidón. Los resultados se expresan en ppm (mg/L) de S<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

Las medidas se realizaron con un kit de determinación de tiosulfatos de la casa Chemetrics, denominado test de tiosulfatos, con un rango de medida de 5 - 50 ppm, basado en los métodos químicos USEPA para análisis de aguas y residuos (APHA Standard Methods 20a ed., p. 4-173, método 4500-S<sub>2</sub>O<sub>3</sub>- B). Las especificaciones técnicas del test vienen detalladas en el anexo IV.

-Determinación de sulfitos por espectrometría

El método emplea el procedimiento yodométrico. El sulfito se valora con yoduro-yodato en solución ácida utilizando como indicador almidón. Los resultados se expresan en ppm (mg/L) de SO<sub>3</sub>.

Las medidas se realizaron con un kit de determinación de sulfito libre de la casa Chemetrics, denominado test de sulfito libre con un rango de medida de 5 - 50 ppm, basado en los métodos químicos USEPA para análisis de aguas y residuos (APHA

Standard Methods 20a ed., p. 4-173, método 4500-SO<sub>3</sub> 2- B). Las especificaciones técnicas del test vienen detalladas en el anexo IV.

-Determinación de sólidos en suspensión por el método de filtración y secado

Se trata de filtrar las muestras con un volumen de filtración comprendido entre 20 y 100 ml, para después secar en la estufa el filtro y así poder calcular la diferencia de peso aportada por los sólidos. Los resultados se expresan en mg/L.

-Determinación de DQO por espectrometría

La demanda química de oxígeno, es la cantidad de oxígeno consumido por las materias existentes en el agua, cualquiera que sea su origen, orgánico o mineral (hierro ferroso, nitritos, amoníaco, sulfuros y cloruros) y oxidables en condiciones operatorias, se utiliza para medir el nivel general de contaminación orgánica en aguas residuales, lo que se determina midiendo la cantidad equivalente de oxígeno requerido para oxidar la materia orgánica en la muestra. Para ello se emplean kits de la casa Chemetrics basados en el método USEPA para análisis de agua y residuos (método 410.4 (1983) y APHA Standard Methods, 20a ed., p 5-17, método 5220 D) que contienen sulfato mercúrico en el reactivo para eliminar las interferencias de los cloruros. Los resultados se miden por espectrofotometría y se expresan en mg/L.

-Determinación de la DBO<sub>5</sub>

La demanda biológica de oxígeno, es la cantidad de oxígeno consumido por las bacterias, mientras oxidan la materia orgánica presente en la muestra, durante un periodo de 5 días a 20°, expresado en mg O<sub>2</sub>/L. Para esta determinación se digieren las muestras en agitación continua, el valor se determina por medio de una diferencia de presión que mide el cabezal de lectura.

-Determinación de la conductividad por electrometría

El método permite conocer el grado de mineralización en aguas, la lectura se realiza sobre la muestra con un conductímetro. La capacidad de un agua para transportar la corriente eléctrica, depende de la presencia de iones, de su concentración, movilidad,

valencia y concentraciones relativas, así como de la temperatura de medida. Las medidas se expresan en ms/cm.

-Determinación del pH por electrometría

La lectura se realiza sobre la muestra con un pH-metro. La medida de la actividad de los iones  $H^+$ , se consigue por mediciones de la diferencia de potencial entre dos electrodos separados entre sí por una membrana.

-Determinación del nitrógeno total por fotometría

Se trata de la descomposición oxidativa en el bloque calefactor con posterior compensación de interferencias y determinación fotométrica del contenido que tiene la muestra en nitrógeno total. La medida se llevo a cabo con un kit de medida de la casa Macherey & Nagel, los resultados se expresan en mg/L. Las especificaciones técnicas del test vienen detalladas en el anexo IV.

-Toma de muestras y conservación

En el primer ensayo las muestras han estado refrigeradas hasta el momento en que han sido analizadas para conservar mejor sus propiedades, mientras que en el segundo ensayo se dejaba a las muestras madurar a temperatura ambiente hasta que alcanzaban una concentración de sulfuros suficiente para el desarrollo de las pruebas. Como es obvio las muestras se han tomado en diferentes momentos a lo largo de varios días y por lo tanto presentan una composición muy diversa. Esta heterogeneidad se debe a infinidad de factores como por ejemplo la temperatura ambiental, el momento en el que se haya producido un envío de agua residual por parte de una EBAR, etc. De este modo se quiere dejar claro que se ha conseguido una gran representatividad de los diferentes grados de maduración de las aguas residuales existentes.

**Para el estudio de gases se realiza:**

-Medición de oxígeno disuelto y temperatura.

En el primer ensayo la medida es llevada a cabo mediante un medidor de oxígeno disuelto, modelo HI 9146N de la casa HANNA que mide la cantidad de oxígeno disuelto en la muestra en mg/L, la precisión de la medida es de 0,01 mg/L, el intervalo de temperatura lo indica en grados celsius. Las especificaciones técnicas del equipo vienen detalladas en el anexo IV.

En el tercer ensayo la medida se realiza con una sonda multiparamétrica modelo HANNA 9828, que mide la cantidad de oxígeno disuelto en la muestra en mg/L, la precisión de la medida es de 0,01 mg/L, además mide otros parámetros como temperatura, conductividad y pH. Esta dotada de un sistema de almacenamiento de datos que se transmiten al ordenador. Las especificaciones técnicas del test vienen detalladas en el anexo IV.

-Medición de ácido sulfhídrico

La medida del ácido sulfhídrico se realiza mediante un equipo detector portátil de gases, modelo Dräger x-am 5000, que lleva incorporado un sensor de medida del ácido sulfhídrico mediante una reacción electroquímica con una precisión de 0,1 mg/L. El rango de medida será de 0-100 ppm en el primer ensayo, después se le incorporó un segundo sensor con un rango de 0-1000 ppm. El equipo lleva incorporada una bomba de aspiración que absorbe 0,5 L/ min, además cuenta con una memoria interna para el almacenamiento de las lecturas realizadas que se pueden descargar en el ordenador. Las especificaciones técnicas del test vienen detalladas en el anexo IV.

**Para la inyección de aire:**

- Inyección de aire

En el primer ensayo la inyección de aire se suministra a partir de un compresor, modelo Sera air 275R plus, que introduce el aire a las muestras a través de un difusor poroso con un caudal máximo de 137,5 L/h.

-Inyección de aire comprimido

En el tercer ensayo fue necesario el uso de compresores para la inyección de aire comprimido en las tuberías de impulsión, a continuación se presenta una tabla con las características de los equipos compresores.

Punto de actuación	Compresores		
	Modelo	Potencia consumida (kW/h)	Caudal de aire máximo a inyectar (m <sup>3</sup> /h)
Alumbres	COMBA 250R III	1,5	15
Mar de Cristal	R 5,5 IU 10-200	5,5	54,7
Playa Honda IA	UP 5-11-10	11	103,5
Playa Honda IB	UP 5-7-10	7,5	56,6
Playa Honda II	UNIAIR 2	1,5	2,2
Playa Paraíso	R 2,2 IU 10-200	2,2	16,7

Tabla 2.1 Equipos compresores

## Capítulo 3. ESTUDIOS REALIZADOS

---

### 3.1. Estudios de la permanencia de oxígeno y eliminación de sulfuros en muestras aplicando inyección de aire

El propósito de este ensayo es presentar la variación del contenido de oxígeno disuelto en el agua aplicando un tratamiento de inyección de aire, basado en la introducción de aire en el agua residual, además de estudiar la liberación del ácido sulfhídrico que tiene lugar con la aplicación de dicho tratamiento debido a la agitación que dicha inyección provoca, así como contabilizar, en algunos casos, la eliminación de los sulfuros del agua residual como resultado de la oxidación del agua, que tras haber recibido el tratamiento pasa de encontrarse en condiciones anaerobias a condiciones aerobias.

#### 3.1.1. Estudios de la permanencia de oxígeno y eliminación de sulfuros en muestras a un mismo caudal de aire inyectado

Se han utilizado muestras de agua residual bruta procedentes de la entrada a la depuradora de Cabezo Beaza durante la temporada invierno-primavera de 2011.

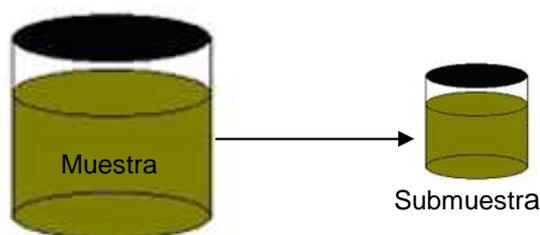


Figura 3.1 Muestras usadas en el ensayo

Para llevar a cabo el ensayo se introduce en el recipiente una submuestra de 0,5 litros y se somete a una agitación durante 5 minutos, seguida de 10 minutos de inyección de aire.

Durante la inyección de aire se trabaja con un caudal constante de aire de (2,25 L/min), midiendo de manera continua y mediante el uso del medidor de gases y el oxímetro, la concentración de ácido sulfhídrico y de oxígeno disuelto.

Se estableció una duración de inyección de aire de 10 minutos debido a que en los resultados obtenidos en unas primeras pruebas se alcanzaba la máxima concentración de oxígeno disuelto para el caudal dado, 2,25 l/min, en ese tiempo.

Se cuantificó el tiempo necesario hasta que la lectura de ácido sulfhídrico liberado a la atmósfera fue nula tras la aplicación de la inyección de aire en cada submuestra, así como la permanencia del oxígeno disuelto en estas a lo largo del tiempo.

<b>Tiempo</b>	<b>Duración</b>	<b>Estado</b>
<b>T1</b>	5 minutos	Agitación
<b>T2</b>	5 minutos	<b>inyección de aire</b>
<b>T3</b>	5 minutos	<b>inyección de aire</b>
<b>T4</b>	5 minutos	Agitación
<b>T5</b>	5 minutos	Agitación
<b>T6</b>	5 minutos	Agitación
<b>T7</b>	5 minutos	Agitación
<b>T8</b>	5 minutos	Agitación
<b>T9</b>	5 minutos	Agitación
<b>T10</b>	5 minutos	Agitación
<b>T11</b>	5 minutos	Agitación
<b>T12</b>	5 minutos	Agitación
<b>T13</b>	5 minutos	Agitación

Tabla 3.1 Duración de las distintas fases del tratamiento

En la tabla 3.1 se muestra la duración de las fases del tratamiento, las submuestras se someten a una agitación durante 5 minutos, seguidas de 10 minutos de inyección de aire, para finalizar con una agitación.

- **Medida de H<sub>2</sub>S**

La tabla 3.2 muestra como evoluciona la liberación de ácido sulfhídrico a la atmósfera del recipiente que contiene la submuestra, tomándose medidas cada 5 minutos.

Estado	Agitación	inyección de aire		Agitación				
		T2 0:05	T3 0:10	T4 0:15	T5 0:20	T6 0:25	T7 0:30	T8 0:35
Tiempo	T1 0:00							
Muestra	Medida de la [H <sub>2</sub> S] ppm							
464	0	3	0,6	2	0	0	0	0
477	15,6	>100	0	0	0	0	0	0
498	3	7,8	4	0,6	0	0	0	0
523	5	15	>100	0	0	0	0	0
546	2	3,8	22	0	0	0	0	0
553	1,2	2,5	0	0	0	0	0	0
554	20	40	43	1,8	0	0	0	0
567	3	1,3	38,6	3,8	0	0	0	0
580	1,3	1,5	2	0	0	0	0	0
614	0	0	0	0	0	0	0	0
617	0	0	0,7	0	0	0	0	0
619	0,9	3	69	0	0	0	0	0
445	0,8	0,9	0	0	0	0	0	0
544	25	21	>100	33	0	0	0	0
442	14	10	>100	17	0	0	0	0
690	5	13,2	94,3	22	3	0	0	0
762	5,6	17,2	>100	8,1	2	0	0	0
765	15	37	>100	18	1,1	0,4	0	0
798	3,8	7,2	11	0	0	0	0	0
817	5	59	>100	77	20,4	0,7	0	0
833	11,8	39,4	>100	39	5,9	0	0	0

Tabla 3.2 Evolución de la concentración de ácido sulfhídrico liberado en el tratamiento.

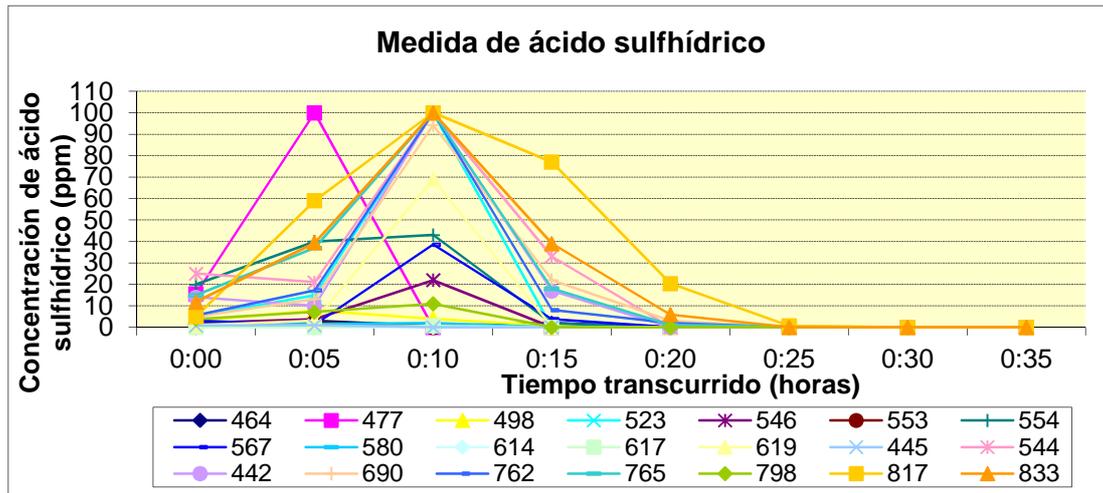


Figura 3.2 Evolución de la concentración de ácido sulfhídrico liberado en el tratamiento

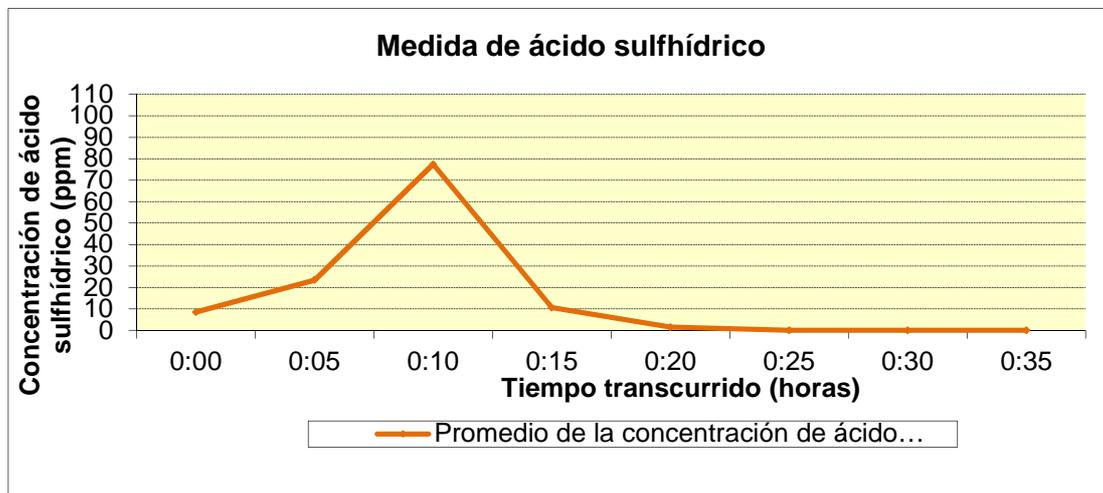


Figura 3.3 Valor promedio de la concentración de ácido sulfhídrico liberado en el tratamiento

A la vista de los resultados mostrados en las figuras 3.2 y 3.3 que ilustran el comportamiento que sigue el ácido sulfhídrico con la inyección de aire para las diferentes submuestras y el promedio de estas, se puede observar el efecto que produce la inyección de aire sobre el ácido sulfhídrico que hay disuelto en el agua residual, haciendo que éste se libere fácilmente desde la submuestra hasta la atmósfera. En muchos casos 10 minutos de inyección de aire son suficientes para eliminar por completo el ácido sulfhídrico disuelto, con el caudal de aire de 2,25 l/min. Otras muestras por el contrario necesitan un tiempo mayor de tratamiento para una liberación total de dicho gas a la atmósfera, eliminándose así los sulfuros disueltos. Además, se observa, como mediante la agitación también se libera ácido sulfhídrico aunque a unos niveles inferiores.

Es necesario aclarar que se obtuvieron medidas de ácido sulfhídrico que se escapan al rango del medidor de gases, como se muestra en la tabla 3.2, donde aparecen valores que superan la concentración de 100 ppm. Para estos valores no se ha podido determinar la medida máxima alcanzada, esto es debido a que se trabajó con un medidor de gases de bajo rango, para aumentar la exactitud de las medidas, ya que la precisión de este es de décimas de ppm, mientras que los medidores de alto rango hacen lecturas de unidades de ppm, además hay que añadir que en un principio se esperaba que no se alcanzarán niveles tan altos de ácido sulfhídrico en volúmenes de la escala a los utilizados en el laboratorio. Por ello en ensayos posteriores se incorporó un sensor al medidor de gases que puede llegar a medir concentraciones de ácido sulfhídrico hasta 1000 ppm, de manera que podremos concretar los niveles máximos alcanzados para este gas. Las concentraciones elevadas de ácido sulfhídrico indican el estado en que se encuentran las muestras analizadas, es decir, se trata de muestras muy maduras que han pasado el tiempo suficiente en la red de saneamiento como para perder el oxígeno y reducir parte de los sulfatos presentes a sulfuros.

Por otro lado los resultados muestran que el elevado caudal de inyección de aire provoca que se libere muy rápidamente el ácido sulfhídrico que hay disuelto, por lo que resultará más adecuado utilizar otros caudales de aire más bajos, que liberen así este gas más lentamente, de manera que no se alcancen concentraciones tan elevadas.

- **Medida del oxígeno disuelto**

Se estudió como aumentaba el contenido de oxígeno disuelto en el agua con el tratamiento de inyección de aire, a continuación se presenta la tabla 3.3 donde se muestra cómo evoluciona la concentración de oxígeno disuelto, aportando las mediciones tomadas durante el ensayo cada 5 minutos hasta completar 1 hora. Estos valores se representan en las figuras 3.4 y 3.5, donde se muestra la evolución de la concentración de oxígeno disuelto en el tratamiento de inyección de aire para cada submuestra y el promedio de todas ellas respectivamente.

	Agitación	inyección de aire		Agitación								
Tiempo	0:00	0:05	0:10	0:15	0:20	0:25	0:30	0:35	0:40	0:45	0:50	0:55
Muestras	Medida de la [O <sub>2</sub> ] mg/L											
464	0,23	4,71	8,24	6,75	5,85	4,27	3,9	3,2	2,83	2,24	1,86	1,32
477	0,18	7,25	7,56	6,66	5,74	4,54	3,97	3,12	2,53	1,74	1,2	0,56
498	0,18	7,41	7,83	6,03	5,2	4,83	4,75	4,63	4,59	4,42	4,24	4,15
523	5,4	7,29	6,99	5,96	4,98	4,41	3,89	3,67	3,59	3,42	3,27	3,1
546	0,18	5,8	7,63	6,17	5,63	5,2	4,84	4,55	4,36	4,18	4,05	3,93
553	0,4	5,34	5,5	4,45	4,01	3,75	3,63	3,25	3,01	2,82	2,68	2,53
554	0,42	4,61	5,48	3,95	2,83	1,77	1,41	1,22	0,91	0,8	0,69	0,52
567	0,4	8,3	7,67	7,27	6,89	6,55	6,24	6	5,75	5,48	5,23	5,19
580	0,54	7	8,9	7,8	7,28	6,79	6,34	5,95	5,7	5,51	5,37	5,25
614	0,3	5,97	6,6	5,6	4,5	3,18	2,26	1,42	0,65	0,22	0,22	0,22
617	0,35	6,15	6,35	5,34	4,24	3,18	2,21	1,27	0,35	0,18	0,18	0,18
619	0,19	5,93	7,56	5,7	4,08	2,49	1,07	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14
445	0,2	7,23	7,87	7,22	7,02	6,7	4,9	4,8	4,7	4,6	4,5	4,4
544	0,11	7,03	7,32	6,86	6	5,52	5,11	4,67	4,12	3,7	3,11	2,62
442	0,24	6,93	7,5	6,77	6,2	5,05	4,84	4,59	4,15	4,01	3,25	2,7
690	0,12	7,65	7,25	6,6	6,37	6,01	5,57	5,34	5,05	4,86	4,67	4,4
762	0,18	6,36	6,9	6,3	5,61	5,04	4,49	3,98	3,6	3,16	2,69	2,32
765	0,21	6,08	6,56	5,45	4,62	4	3,65	3,01	2,61	2,1	1,65	1,35
798	0,2	7,26	7,53	6,59	5,9	5,12	4,63	4,12	3,66	3,36	2,98	2,6
817	0,19	6,23	6,85	5,4	5,2	4,45	4,26	4,11	4,07	3,6	3,5	2,99
833	0,18	6,5	7,1	6,5	5,4	4,8	4,25	3,65	3,2	2,75	2,25	1,998

Tabla 3.3 Concentración de oxígeno disuelto en el tratamiento

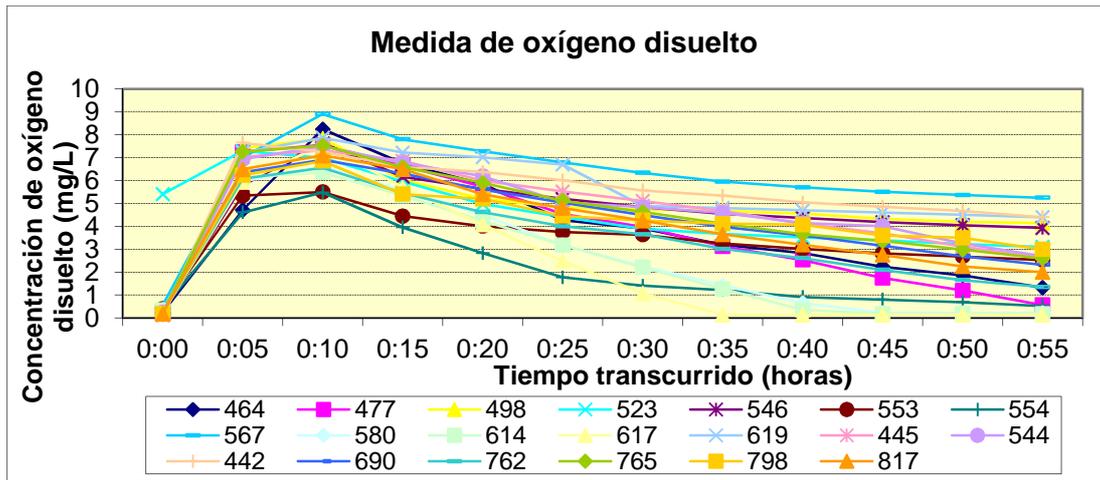


Figura 3.4 Evolución de la concentración de oxígeno disuelto en el tratamiento.

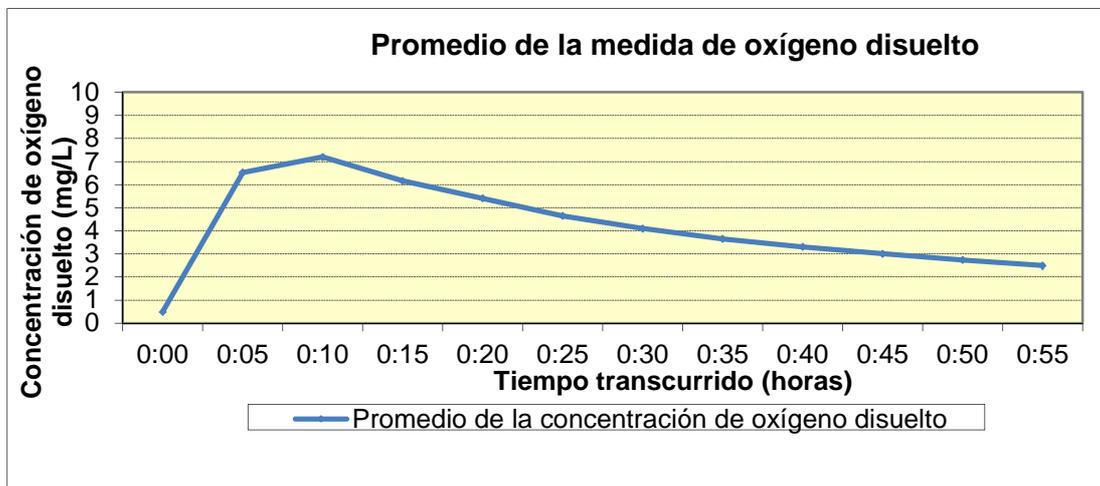


Figura 3.5 Promedio de la evolución de la concentración de oxígeno disuelto en el tratamiento.

En las figuras 3.4 y 3.5 se observa el aumento de la concentración de oxígeno disuelto en el agua residual que se consigue con una inyección de aire de 10 minutos de duración y para el caudal de aire de 2,25 L/min, donde las submuestras alcanzan un valor máximo de 8 mg/L de oxígeno disuelto, llegando así a unas condiciones plenamente aerobias, donde se produce la oxidación de los sulfuros presentes y se evita la generación de los mismos, debido a que los sulfatos presentes ya no pueden reducirse.

Se realizaron pruebas de mayor duración de inyección de aire, pero las concentraciones alcanzadas eran semejantes a las conseguidas con 10 minutos de tratamiento, por lo que se consideró que esta duración era la que mejor se adaptaba a

las necesidades del tratamiento, donde se mantuvieron concentraciones de oxígeno transcurrida una hora torno a 1 mg/L.

- **Medida de sulfuros disueltos**

Para conocer el contenido de sulfuros que eran susceptibles de liberarse a la atmósfera como ácido sulfhídrico, se midieron los sulfuros disueltos, esta medida engloba a diferentes especies como son  $H_2S$ ,  $HS^-$  y  $S^{2-}$  y sulfuros metálicos solubles. Así mediante esta medida se puede conocer la efectividad del tratamiento de inyección de aire para eliminar los sulfuros disueltos.

Hay que aclarar que especies que se encuentran en un estado de oxidación intermedio como los tiosulfatos, son susceptibles de causar interferencias en esta medida, pudiendo llegar a representar estas el 10%.

Como se puede observar en la tabla 3.4 y en la figura 3.6, las mediciones efectuadas sobre las submuestras aireadas obtuvieron valores en torno a 0,1 mg/L, mientras que las muestras sin tratar llegaban a alcanzar concentraciones de 11 mg/L, por tanto el efecto de la inyección de aire en cuanto a la eliminación de sulfuros es eficaz. Estos resultados se presentan en la tabla 3.4 y la figura 3.6.

<b>Muestra Nº</b>	<b>Sulfuros (mg/L) Submuestra bruta</b>	<b>Sulfuros (mg/L) Submuestra tratada</b>	<b>Sulfuros (mg/L) eliminados</b>
<b>464</b>	1	0	1
<b>477</b>	5	0,3	4,7
<b>498</b>	1	0,1	0,9
<b>523</b>	5	0,1	4,9
<b>546</b>	0,4	0,1	0,3
<b>553</b>	2	0,1	1,9
<b>554</b>	5	0,2	4,8
<b>567</b>	2	0,2	1,8
<b>580</b>	0,4	0,1	0,3
<b>614</b>	0	0	0
<b>617</b>	0,1	0	0,1
<b>619</b>	5	0	5
<b>445</b>	0,1	0	0,1
<b>544</b>	8	0	8
<b>442</b>	5	0,1	4,9
<b>690</b>	6	0	6
<b>762</b>	9	0,1	8,9
<b>765</b>	12	0,2	11,8
<b>798</b>	2	0,1	1,9
<b>817</b>	12	0,1	11,9
<b>833</b>	8	0,1	7,9

Tabla 3.4 Evolución de los sulfuros disueltos en el tratamiento.

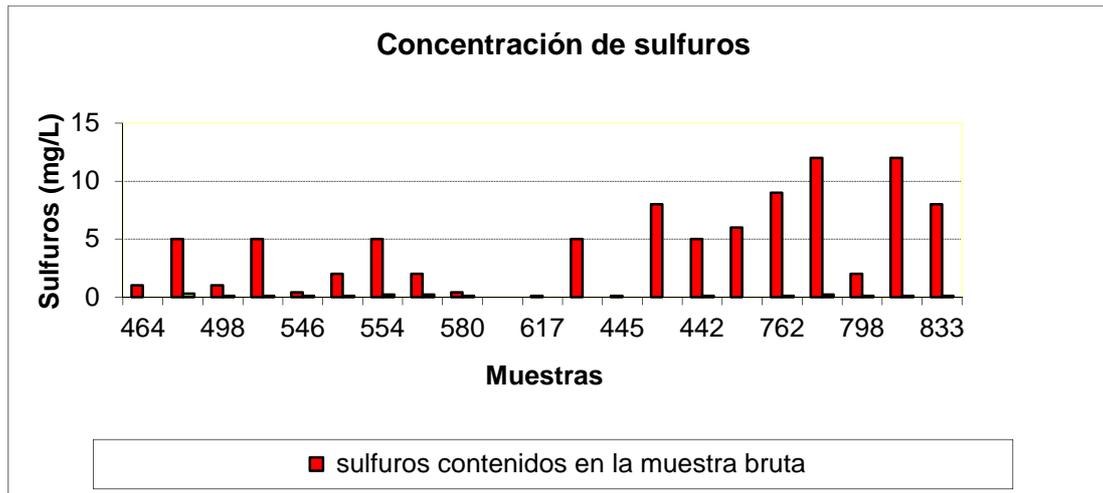


Figura 3.6 Evolución de los sulfuros disueltos en el tratamiento.

- **Otras medidas**

En cuanto a otras medidas realizadas se observó que la inyección de aire tenía un efecto como pretratamiento de las aguas residuales en tanto que disminuía la medida de la DBO<sub>5</sub>, este estudio se hizo con mayor detenimiento en la segunda parte del ensayo.

Otro punto interesante dentro de este estudio fue conocer la eficacia del tratamiento como bactericida, la transformación de los sulfatos presentes a sulfuros es desarrollada por bacterias anaerobias estrictas. Por este motivo se hicieron análisis microbiológicos que desvelaron que este tratamiento no era suficiente para la eliminación de estas bacterias, ya que son muy resistentes y pasan a su forma esporulada para protegerse de las agresiones externas.

Al final del documento, en el Anexo I, se puede encontrar los gráficos, para cada muestra estudiada, resultantes del estudio de gases así como sus respectivos análisis físico-químicos.

### 3.1.2. Estudios de la permanencia de oxígeno y eliminación de sulfuros en muestras a diferentes caudales de aire inyectado

Se pretende cuantificar las concentraciones de oxígeno disuelto en el agua al aplicar diferentes caudales de aire y el contenido de ácido sulfhídrico que se libera al variar éstos caudales. Para llevarlo a cabo se hace necesario utilizar un mayor volumen de cada muestra debido a que se van a repartir en 6 submuestras, a las que se les aplican diferentes caudales de inyección de aire. El tiempo de aplicación de la inyección de aire será de 10 minutos, ya que los resultados obtenidos anteriormente indican que este tiempo es suficiente para oxigenar el agua.

Se ha trabajado con muestras de agua residual urbana bruta procedentes de la zona de la costa (EBAR “Las Gaviotas”, La Manga del Mar Menor), debido a los malos olores que se producen en esta zona, ya que estas aguas son ricas en sulfatos y en verano debido a la subida de la temperatura hay una menor concentración de oxígeno disuelto y una mayor actividad bacteriana, por tanto son aguas susceptibles de generar gran cantidad de sulfuros. Las muestras han estado refrigeradas hasta el momento en que han sido analizadas.

Los caudales suministrados de aire son:

Medidas	Unidades	A	B	C	D	E	F
Q Aire	L/min	2,25	1,69	1,12	0,56	0,22	0

Tabla 3.5 Caudales de aire suministrados

Es fundamental ajustar el mínimo caudal de aire que permita una buena oxigenación del agua residual a la vez que la liberación del ácido sulfhídrico se produzca lo más despacio posible para que las concentraciones del gas en la atmósfera no sean muy elevadas. Además se incluye una submuestra con caudal de aire nulo, es decir simplemente con agitación (F).

En el ensayo se trabaja con 0,5 litros de agua residual para cada una de las submuestras, son 6 (A, B, C, D, E y F). El instrumental empleado para desarrollar el ensayo es el mismo que se usó en la primera parte y que se mostraba en la figura 3.1, el reparto de las submuestras quedaría como se representa en la figura 3.7.

Las medidas se realizan de manera continua y mediante el uso del medidor de gases y el oxímetro, para determinar la concentración de ácido sulfhídrico y de oxígeno disuelto respectivamente, para cada submuestra, observando como evoluciona el ácido sulfhídrico liberado con la inyección de aire y cuantificando el momento en que se produce la máxima concentración del mismo, además se realiza la medición de oxígeno disuelto durante la inyección de aire y 30 minutos después de ser aplicado el tratamiento, para comparar los niveles que se mantienen con cada caudal de aire aportado.

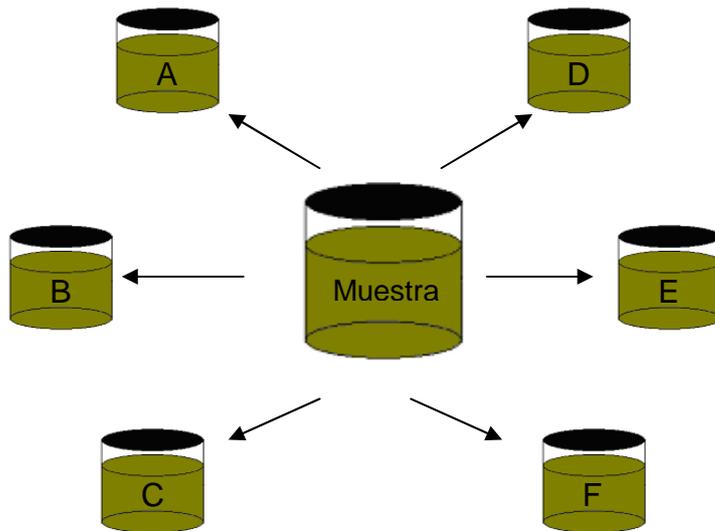


Figura 3.7 Muestras usadas en el ensayo

La designación que se le da a cada submuestra corresponde con el caudal de inyección de aire que se le aplica a cada una de ellas. A continuación se presentan los resultados extraídos de esta segunda parte del ensayo.

- **Medida de ácido sulfhídrico**

La tabla 3.6 detalla el comportamiento que han tenido las muestras, con los valores máximos de ácido sulfhídrico medidos para cada submuestra.

<b>CAUDALES DE INYECCIÓN DE AIRE</b>						
	<b>A</b>	<b>B</b>	<b>C</b>	<b>D</b>	<b>E</b>	<b>F</b>
<b>Nº Muestra</b>	<b>[H<sub>2</sub>S] máxima ppm</b>					
<b>945</b>	18	11	4	1,2	0,6	0
<b>966</b>	100	100	100	100	100	77
<b>978</b>	100	100	100	100	100	59
<b>979</b>	100	100	100	100	100	67,5
<b>982</b>	100	100	30	14	8	3,6
<b>983</b>	100	100	100	100	100	85
<b>995</b>	30	28,6	28,2	28	27,8	16
<b>1032</b>	72,5	73	73,5	73,5	79	23,6
<b>1049</b>	100	100	100	100	100	33,6
<b>1064</b>	100	100	100	100	100	54,5
<b>1076</b>	100	100	100	100	100	92
<b>1087</b>	100	100	100	100	100	70
<b>1098</b>	100	100	100	100	100	65
<b>1109</b>	100	100	100	100	100	100
<b>1111</b>	100	100	100	100	100	37,4
<b>1129</b>	100	100	100	100	100	36
<b>1140</b>	100	100	100	100	100	68,5
<b>1141</b>	100	100	100	100	100	34,2

Tabla 3.6 Medida máxima del ácido Sulfhídrico.

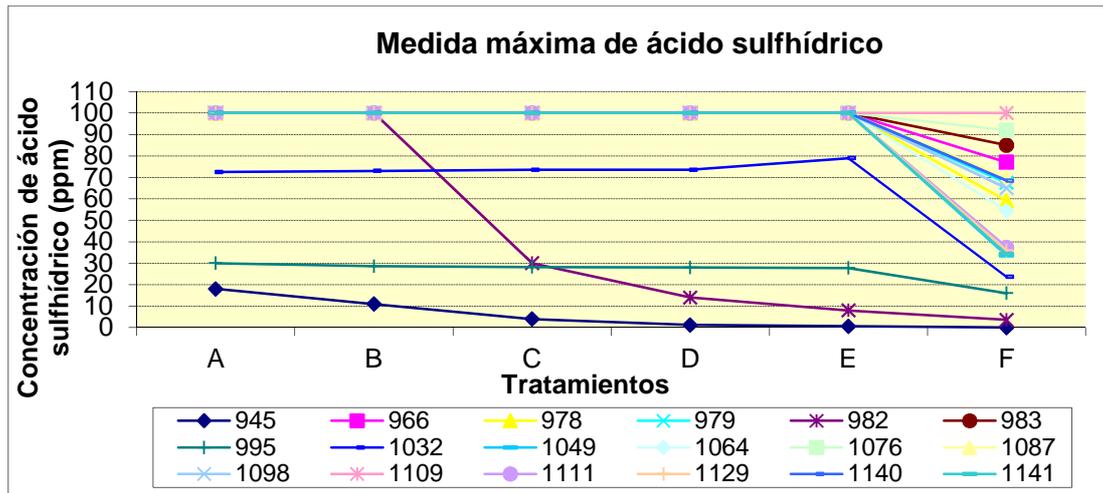


Figura 3.8 Medida máxima del ácido sulfhídrico.

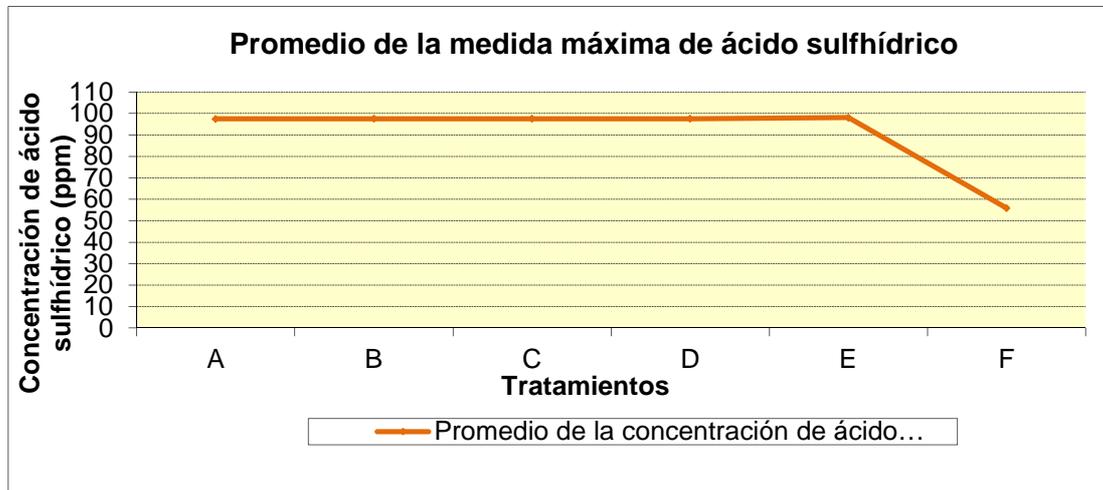


Figura 3.9 Promedio de la medida máxima del ácido sulfhídrico

En la figura 3.8 se muestran las concentraciones máximas alcanzadas de ácido sulfhídrico para los distintos caudales de aire y para cada muestra, hay que señalar que la medida de 100 ppm, es la máxima concentración que el medidor de gases es capaz de medir, lo que hace necesario incorporar un medidor con mayor rango de lectura, como se comentó anteriormente, se puede observar que estas muestras dan unas medidas de sulfhídrico elevadas, por ello hay que aclarar que estas muestras, pertenecen a los meses de Julio y Agosto, época en la que el efecto de la temperatura interfiere en gran medida en la generación de sulfuros y liberación de ácido sulfhídrico a la atmósfera.

En la figura 3.9 se representa el valor promedio de la cantidad máxima de ácido sulfhídrico alcanzada mientras se le aplica la inyección de aire a las submuestras, se observan grandes diferencias entre la concentración que se alcanza de ácido sulfhídrico con la inyección de aire en comparación con la agitación, (F), obteniéndose concentraciones elevadas en los casos donde se aplicó aire, lo que conduce a pensar en que habría que trabajar con caudales menores a los utilizados en el ensayo, para conseguir que la concentración de ácido sulfhídrico liberado durante la inyección de aire sea menor. También se cuantificó el tiempo en el que se alcanza la máxima concentración de ácido sulfhídrico durante la inyección de aire, lo que se presenta en la tabla 3.7 y en las figuras 3.10 y 3.11.

**CAUDALES DE INYECCIÓN DE AIRE**

<b>Nº</b>	<b>A</b>	<b>B</b>	<b>C</b>	<b>D</b>	<b>E</b>	<b>F</b>
<b>Muestra</b>	<b>Tiempo en alcanzar [H<sub>2</sub>S] máxima</b>					
945	5"	17"	23"	27"	56"	2'30"
966	5"	15"	20"	30"	60"	4'30"
978	27"	30"	35"	40"	50"	2'30"
979	20"	30"	35"	58"	1'12"	1'30"
982	25"	30"	40"	43"	50"	55"
983	30"	35"	45"	1'	1'20"	1'30"
995	10"	30"	1'	1'20"	2'	2'40"
1032	1'	30"	1'	1'	1'30"	1'15"
1049	30"	40"	50"	1'	1'20"	1'
1064	15"	20"	25"	27"	30"	2'
1076	15"	15"	25"	30"	35"	1'40"
1087	23"	28"	45"	53"	58"	1'30'
1098	18"	30"	35"	45"	1'	1'30"
1109	15"	17"	20"	24"	30"	30"
1111	30"	35"	40"	47"	55"	2'30"
1129	15"	20"	25"	27"	32"	2'10"
1140	15"	20"	22"	50"	1'10"	1'15"
1141	20"	23"	27"	35"	45"	2'10"

Tabla 3.7 Tiempo en alcanzar la máxima concentración de ácido sulfhídrico

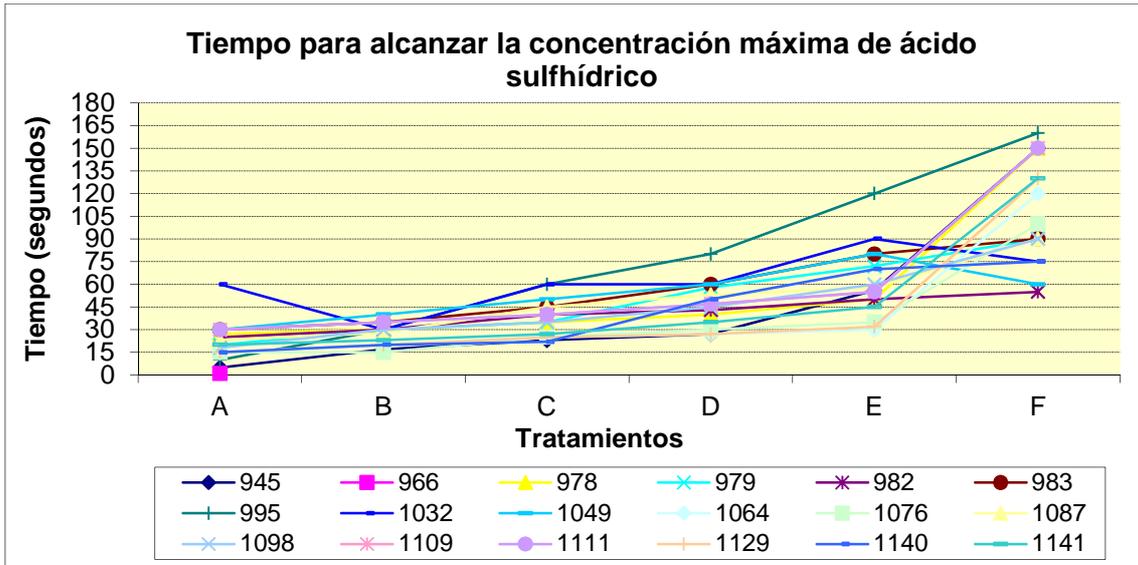


Figura 3.10 Tiempo en alcanzar la máxima concentración de ácido Sulfhídrico.

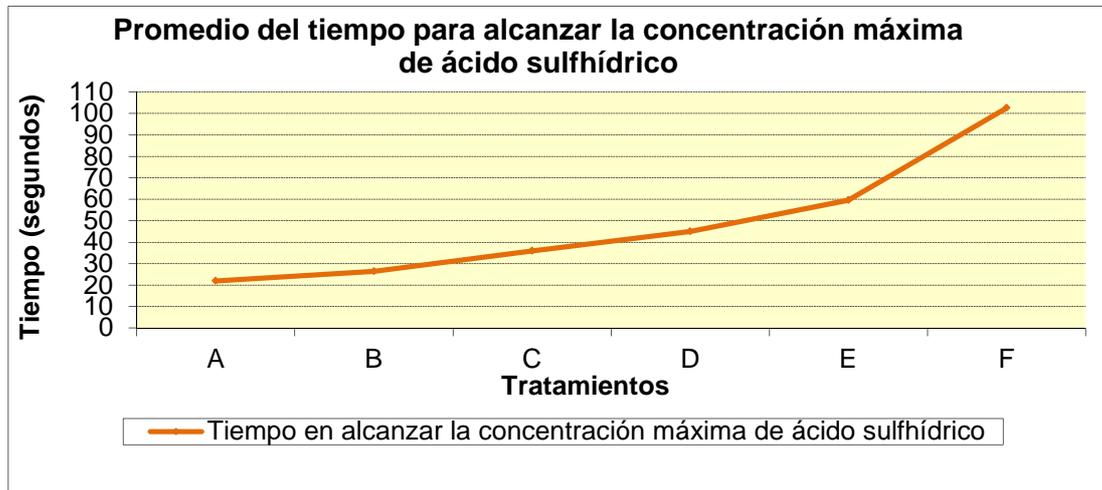


Figura 3.11 Promedio del tiempo en alcanzar la máxima concentración de ácido Sulfhídrico.

Los resultados muestran que los caudales de aire más elevados consiguen liberar mayor cantidad de ácido sulfhídrico en un tiempo menor, lo que implica que aquellas muestras que sean tratadas con caudales de aire bajos liberan más lentamente dicho gas, en la figura 3.11 se muestra la tendencia seguida por las muestras.

Transcurrido el tiempo de inyección de aire y agitación se realizó otra lectura de la concentración de ácido sulfhídrico liberada a la atmósfera del recipiente, los resultados se presentan en la tabla 3.8 y en las figuras 3.12 y 3.13.

CAUDALES DE INYECCIÓN DE AIRE

Nº	A	B	C	D	E	F
<b>Muestra</b>	Medida de Ácido Sulfhídrico (ppm)					
945	3	1	0	0	0	0
966	1,9	3	7	22	50	60
978	1,2	3,6	7,5	18	40	46
979	31,4	38,6	50	62	94	42,4
982	26,8	22,2	8	5,2	3,9	2,8
983	61	69	84	100	100	76
995	12,4	13,2	14,9	16,5	18	12
1032	18	40	28	31	38	19,5
1049	48,5	59,8	64	68	70	30,8
1064	59	67	85	100	100	46
1076	66	81,5	95	100	100	84
1087	50	65	82	97,5	100	43
1098	79	97	100	100	100	30,8
1109	71,5	80,5	87	100	100	69
1111	23,2	27	32	44,2	66	3,5
1129	17,2	28,8	31,4	39,6	56	33,2
1140	47	57	63	71	84	60,5
1141	34,6	45,6	60,5	74	90,5	30,6

Tabla 3.8 Medida de ácido sulfhídrico al final de los 10 minutos de inyección de aire.

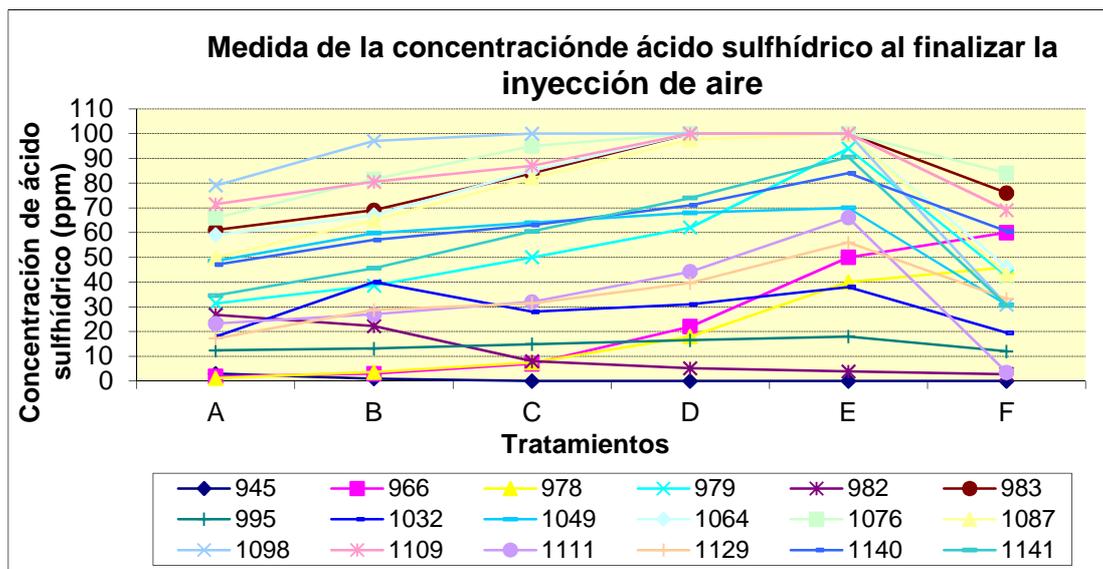


Figura 3.12 Medida de ácido sulfhídrico al final de los 10 minutos de inyección de aire.

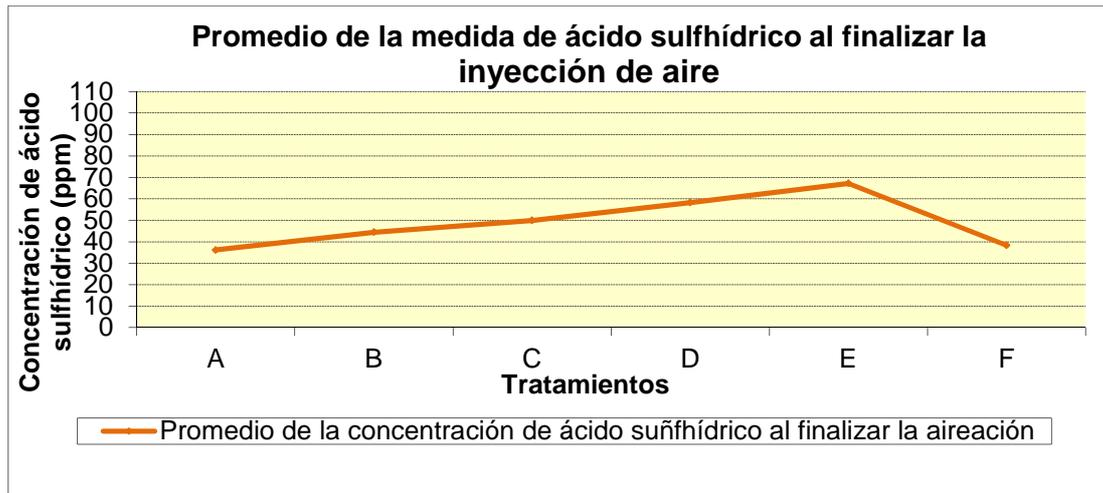


Figura 3.13 Promedio de la medida de ácido sulfhídrico al final de los 10 minutos de inyección de aire.

Los resultados obtenidos de esta última medida corroboran de que las submuestras que son tratadas con caudales de aire inferiores tardan más tiempo en liberar el ácido sulfhídrico, prueba de ello es que transcurrido el tiempo de inyección de aire, la concentración que liberan del gas es superior a la de las submuestras tratadas con caudales mayores de aire. De esta manera se ha conseguido mediante la inyección de aire que el agua residual se desprenda de la inmensa mayoría de los sulfuros disueltos desplazándolos a la atmósfera como ácido sulfhídrico, además de aportar una concentración de oxígeno disuelto adecuada para que se evite que se den condiciones reductoras donde se sigan transformando los sulfatos a sulfuros. Desde el punto de vista práctico resulta interesante conocer la cantidad de ácido sulfhídrico eliminado durante el tratamiento, conociendo las medidas alcanzadas del gas durante la inyección de aire, para los distintos caudales de aire se puede conocer la masa de gas que se ha desplazado, este enfoque se quiere tener en cuenta en futuros ensayos, donde se dispondrá del sensor de gases de alto rango.

- **Medida del oxígeno disuelto**

De manera paralela se estudió el efecto que tenían sobre las muestras los distintos caudales de aire en relación con el oxígeno disuelto para cada caso y así conocer si las concentraciones que se alcanzaban eran similares en los 10 minutos de duración del tratamiento a pesar de trabajar con caudales de aire bajos. Para ello se midió el

contenido en Oxígeno disuelto tras aplicar 10 minutos de inyección de aire en las submuestras con los diferentes caudales, los resultados se presentan en la tabla 3.9 y en las figuras 3.14 y 3.15.

CAUDALES DE INYECCIÓN DE AIRE						
Nº	A	B	C	D	E	F
Muestra	Oxígeno disuelto (mg/L)					
945	7,55	7,4	7,3	6,95	6,15	0,16
966	7,6	7,08	6,8	6,45	5,27	0,16
978	7,3	6,98	7,03	6,07	4,9	0,16
979	7,3	7,07	6,55	6,09	5,12	0,16
982	7,63	7,56	6,9	6,2	4,63	0,16
983	7,24	6,91	6,61	6,43	4,92	0,16
995	7,25	6,89	6,53	5,1	4,62	0,16
1032	6,06	5,21	5,4	5	3,7	0,16
1049	6,08	5,52	5,22	4,97	4,84	0,16
1064	6,71	6,95	6,45	6,1	5,05	0,16
1076	6,8	6,51	6,4	5,85	4,9	0,16
1087	7,2	7,06	6,86	6,58	5,91	0,16
1098	7,47	6,62	6,15	5,8	5,33	0,16
1109	7,35	7,1	6,91	6,4	5,12	0,16
1111	7,3	6,97	6,72	6,6	5,4	0,16
1129	7,2	7,02	6,9	6,6	5,69	0,16
1140	7,4	7,07	6,79	6,36	5,6	0,16
1141	7,61	7,22	6,89	6,44	5,18	0,16

Tabla 3.9 Medida de la concentración de oxígeno disuelto al final de 10 minutos de inyección de aire.

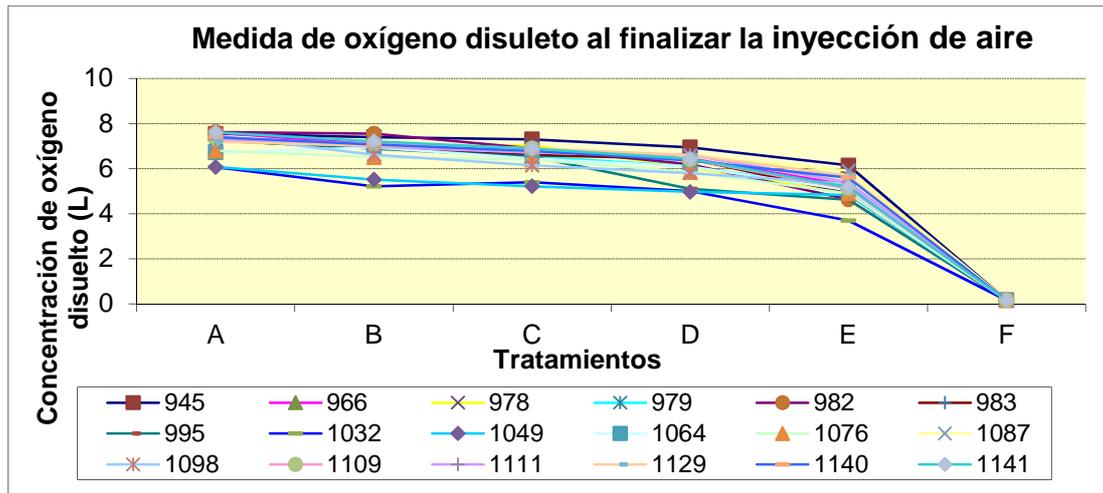


Figura 3.14 Concentración de oxígeno disuelto al final de los 10 minutos de inyección de aire.

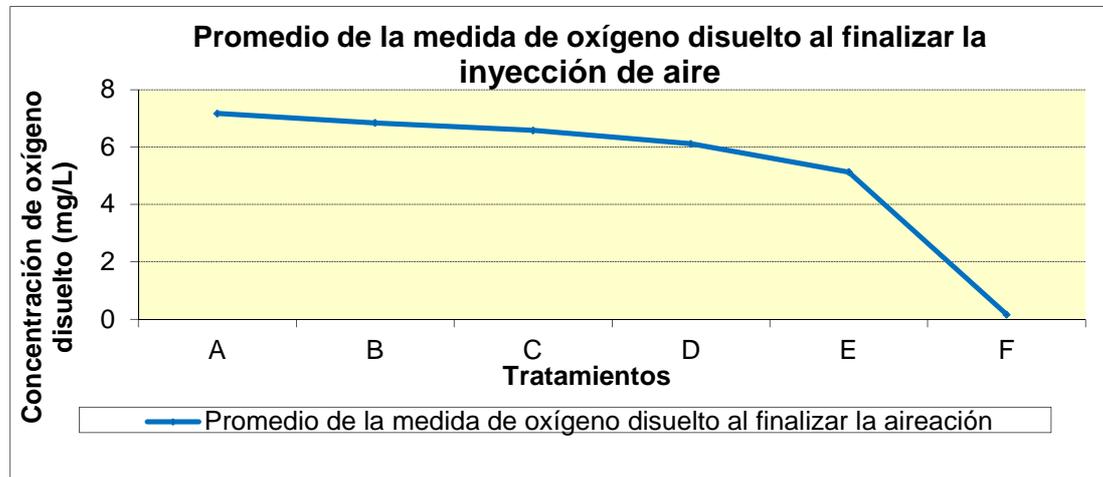


Figura 3.15 Promedio de la concentración de oxígeno disuelto al final de los 10 minutos de inyección de aire.

En la figura 3.14 se observa como se logra alcanzar una cantidad similar con los diferentes caudales de aire, el caudal más bajo (E), ha conseguido un buen contenido en oxígeno, lo cual resulta interesante desde el punto de vista práctico ya que llevado a una situación real, en la que se realizase la inyección de aire en una cántara de bombeo por medio de sistemas difusores se acercaría más a los caudales suministrados por estos equipos. No obstante hay que conocer el tiempo que permanece el oxígeno disuelto en el agua manteniendo unas condiciones aerobias, para lo cual se midió el contenido de oxígeno en las submuestras a los 30 minutos tras aplicar los distintos caudales de inyección de aire, dando los valores que se muestran en la tabla 3.10 y en las figuras 3.16 y 3.17.

CAUDALES DE INYECCIÓN DE AIRE

Nº	A	B	C	D	E	F
Muestra	oxígeno disuelto (mg/L)					
945	3,4	2,85	2,65	1,9	1,2	0,16
966	2,8	2,65	2,35	1,6	0,9	0,16
978	3,7	3,03	2,78	2,6	2,3	0,16
979	3,9	3,2	2,8	1,83	0,9	0,16
982	3,55	3,26	2,42	2,08	0,4	0,16
983	1,4	0,7	0,53	0,43	0,1	0,16
995	3,42	3,26	3,02	1,8	1,3	0,16
1032	3	2,6	2,28	1,89	0,53	0,16
1049	3,05	2,75	2,65	2,42	2,2	0,16
1064	2,6	1,8	1,4	1,23	1,1	0,16
1076	2,65	2,2	1,15	1,1	0,72	0,16
1087	4,9	4,1	3,8	3,49	2,41	0,16
1098	2,3	1,8	1,25	0,76	0,6	0,16
1109	0,96	0,84	0,61	0,2	0,16	0,16
1111	3,9	3,2	2,99	2,54	1,35	0,16
1129	4,06	3,75	3,44	3,17	2,4	0,16
1140	2,87	2,72	2,35	1,48	1,1	0,16
1141	3,7	3,28	2,94	2,46	1,23	0,16

Tabla 3.10 Medida de la concentración de oxígeno disuelto 30 minutos después de la inyección de aire

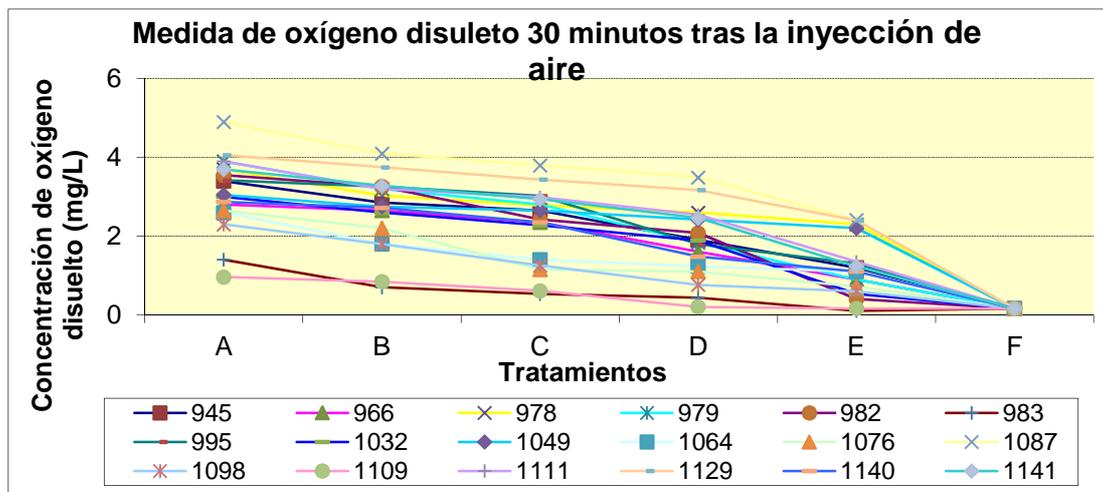


Figura 3.16 Medida de la concentración de oxígeno disuelto 30 minutos después de la inyección de aire.

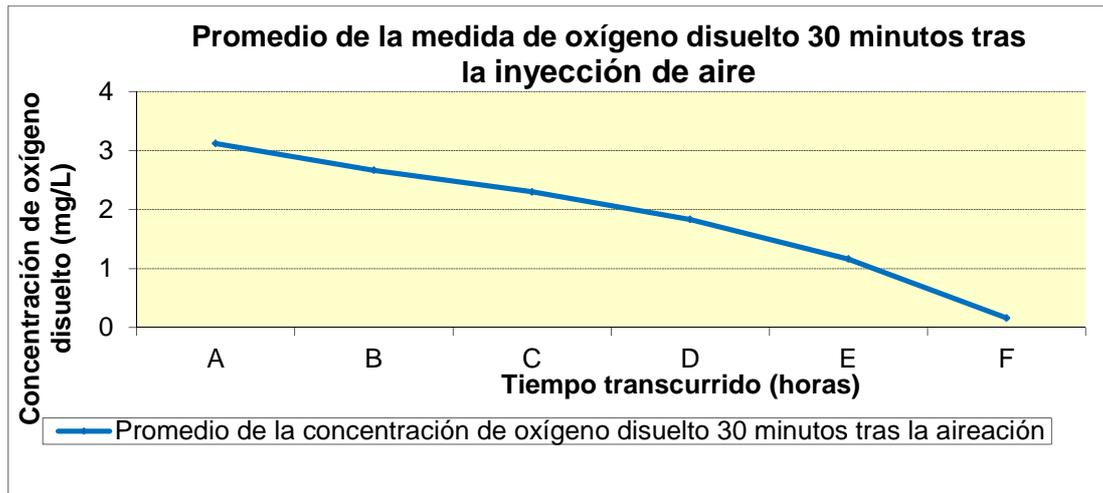


Figura 3.17 Promedio de la concentración de Oxígeno disuelto 30 minutos después de la inyección de aire.

La figura 3.17 representa el valor promedio del contenido en oxígeno disuelto de las submuestras 30 minutos después de haberles aplicado la inyección de aire correspondiente a cada una, se observa que las submuestras tratadas con caudales superiores conservan durante más tiempo el oxígeno. Aun así las que se trataron con el caudal de aire menor, 0,22 L/min, dieron un nivel de oxígeno disuelto en torno a 1 mg/L, valor suficiente para que no se sigan generando los compuestos reducidos del azufre.

Con las medidas que se han realizado se puede calcular la tasa de consumo de oxígeno que viene dada por la pendiente de la recta, resultando ser 5,5 mg/L h.

- **Medida de los sulfuros disueltos**

Se estudio el contenido en sulfuros disueltos en las muestras que no habían recibido el tratamiento de inyección de aire, es decir de las muestras brutas, así como de estas mismas tras haber sido tratadas con el máximo caudal de inyección de aire (2,25 L/min), el resto de las submuestras no pudieron ser medidas por falta de material, los resultados de las medidas se muestran a continuación en la tabla 3.11 y en la figura 3.20.

**CAUDALES DE INYECCIÓN DE AIRE**

Nº	Bruta	A
Muestra	Concentración de sulfuros disueltos (mg/L)	
945	1	0
966	15	0,4
978	12	0,4
979	10	0,2
982	10	0,1
983	24	0,6
995	8	0,1
1032	10	0,3
1049	12	0,3
1064	15	0,4
1076	18	2
1087	20	3
1098	15	1
1109	30	5
1111	12	0,3
1129	16	0,4
1140	20	2
1141	13	1

Tabla 3.11 Concentración de sulfuros disueltos.

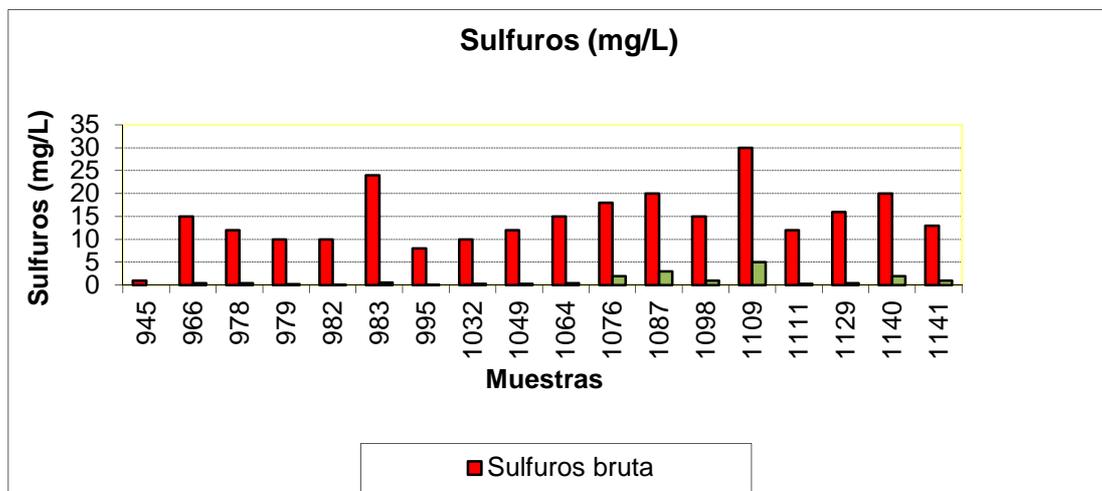


Figura 3.18 contenido en sulfuros disueltos antes del tratamiento de inyección de aire y tras aplicarle el caudal de 2.25 L/min.

Los resultados muestran la eficiencia del proceso de inyección de aire para eliminar los sulfuros disueltos, esta prueba se realizará en futuros ensayos para agua tratada con una simple agitación, con el fin de estimar la cantidad de sulfuros disueltos que pueden quedar tras aplicar el tratamiento.

- **Medida de sulfatos**

Se hicieron medidas de los sulfatos para cada caudal de inyección de aire, con la intención de comprobar si el contenido de sulfatos aumentaba al oxidar las muestras con la inyección de aire y así averiguar si parte de los sulfuros presentes podían pasar a sulfatos.

CAUDALES DE INYECCIÓN DE AIRE							
Nº	Bruta	A	B	C	D	E	F
Muestra	Sulfatos (mg/L)						
945	470	430	450	450	450	470	470
966	340	330	380	350	330	330	330
978	400	390	380	380	370	400	370
979	550	540	540	540	540	520	500
982	510	500	500	500	500	480	480
983	450	440	400	440	420	420	420
995	430	400	400	400	400	400	400
1032	700	660	620	700	640	680	640
1049	660	640	600	640	660	660	640
1064	320	320	300	320	320	340	400
1076	300	280	300	280	300	320	340
1087	780	740	740	720	700	760	760
1098	480	480	540	540	540	500	480
1109	480	480	460	560	480	460	480
1111	840	820	780	760	820	760	740
1129	720	660	680	680	680	700	700
1140	720	660	680	680	660	720	700
1141	740	670	690	690	690	700	720

Tabla 3.12 Contenido en sulfatos.

Los resultados de las submuestras brutas comparados con las que habían sido aireadas muestran un ligero descenso en la concentración de sulfatos, que podría estar justificado por la eliminación de sulfuros mediante la liberación del ácido sulfhídrico a la atmósfera y una nueva reducción de sulfatos a sulfuros, una vez que se vuelven a dar las condiciones anaerobias, disminuyendo así la concentración inicial de sulfatos, ya que la medida de estos no se realizó inmediatamente después de realizar la inyección de aire.

- **Medida de la DBO<sub>5</sub>**

CAUDALES DE INYECCIÓN DE AIRE							
Nº	Bruta	A	B	C	D	E	F
Muestra	DBO <sub>5</sub>						
945	600	300	250	470	490	500	550
966	500	260	320	420	380	320	340
978	700	800	750	750	800	750	750
979	300	240	220	200	220	280	240
982	820	440	340	320	920	360	300
983	190	150	170	170	150	160	350
995	300	220	230	250	280	280	290
1032	350	170	290	310	310	320	330
1049	250	300	620	230	210	200	210
1064	400	360	340	370	370	320	340
1076	480	360	410	350	360	370	530
1087	580	360	420	240	280	380	300
1098	460	480	520	540	460	840	720
1109	920	520	440	460	560	500	460
1111	1000	420	240	340	320	360	280
1129	300	320	740	280	260	280	380
1140	420	260	240	220	240	240	420
1141	360	260	420	260	260	240	260

Tabla 3.13 Medida de la DBO<sub>5</sub>.

La medida de  $\text{DBO}_5$  reflejó la eficacia de la inyección de aire como pretratamiento de las aguas residuales, reduciendo el contenido en materia orgánica demandada por los microorganismos.

### **Otras medidas**

Al final del documento, en el Anexo I, se puede encontrar los gráficos, para cada muestra estudiada, resultantes del estudio de gases así como sus respectivos análisis físico-químicos.

### 3.2. Estudio de la eliminación de sulfuros y compuestos reducidos de azufre en muestras mediante ventilación de la atmósfera de la muestra.

El segundo ensayo se pretende realizar una simulación de la ventilación producida por una chimenea situada en un colector de aguas residuales que circula por gravedad, apoyando el modelo en una situación existente, utilizando una bomba de extracción que se incorpora al equipo de medición de gases con el fin de extraer los gases que se van liberando en el interior del recipiente que contiene la muestra de tal manera que se va renovando el aire del interior a través de una pequeña abertura aplicada en un extremo del envase, para que ha medida que se vaya extrayendo el aire del interior del recipiente este se sustituya por aire procedente del exterior. Para el desarrollo del ensayo se necesitará adaptar el caudal de ventilación del equipo de medición de gases al de un caso real y para un volumen de agua dado, además se aplicará una agitación que asemejará el movimiento del agua en el interior de un colector.

En la figura 3.19 se muestra un ejemplo real de aplicación de chimeneas de ventilación en un colector de agua residual y en la figura 3.20 se presenta el modelo a escala.

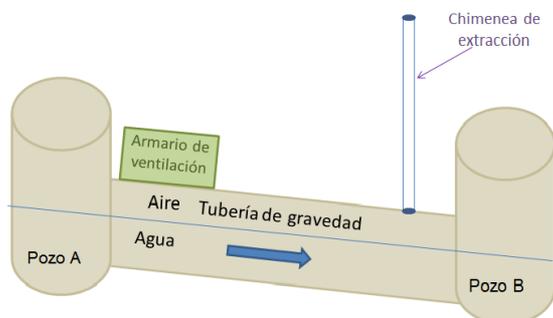


Figura 3.19 Ensayo de eliminación de gases mediante ventilación de aire



Figura 3.20 Adaptación del ensayo a pequeña escala

En el ensayo se tomó como ejemplo el sistema de ventilación mediante chimenea desarrollado en Murcia que se muestra en la figura 3.19, de esta se conoce el caudal de agua que circula por el colector así como las dimensiones de éste y el tamaño de la chimenea, también se dispone de medidas como la velocidad del aire que por ella sale, estos datos se extrapolaron para llevarlos al laboratorio. Los datos de partida figuran en la tabla 3.14

Datos		colector	chimenea
Longitud	m	250	9
Diámetro	m	2	0,2
Caudal	m <sup>3</sup> /h	3900	7821,81

Tabla 3.14 Características de la ventilación en el caso de Murcia

Dadas las características de la tabla 3.14, donde se midió la velocidad de salida del aire de las chimeneas y se obtuvo dicho caudal de ventilación, se da una tasa de 13 renovaciones de aire cada hora. En el ensayo se tuvo en cuenta tanto la tasa de renovación como la relación de volumen ocupado por el agua residual en el colector del 25% y el volumen ocupado por el aire del 75%, de manera que se adaptaron envases de distintos volúmenes a estas proporciones, la duración de la ventilación y de las medidas de ácido sulfhídrico para cada submuestra fue de una hora. Para el ensayo se proponen diferentes situaciones en las que se varía la tasa de renovación, ya que según se ha visto en estudios anteriores, la velocidad del aire en una chimenea varía a lo largo del día, el objetivo del ensayo persigue comprobar la eficiencia de la ventilación de gases en tuberías de gravedad para evitar que a lo largo del recorrido del agua residual hasta llegar a la estación depuradora, esta se vaya enriqueciendo en

sulfuros disueltos, dando como resultado su posterior liberación como ácido sulfhídrico.

El método se basa en el equilibrio que se ha mostrado anteriormente en la introducción, según el cual existe un equilibrio entre las especies  $H_2S$  y  $HS^-$  en función del  $pH-pK_1$ , será una especie u otra la que represente el mayor porcentaje de los sulfuros disueltos, teniendo en cuenta que la parte de  $H_2S$  disuelto es susceptible de escapar a la atmósfera, entonces los sulfuros remanentes serán divididos entre  $H_2S$  y  $HS^-$  en la misma proporción que se encontraban, ya que el equilibrio se restablece de manera inmediata. Por tanto lo que se persigue en este ensayo es verificar el agotamiento de los sulfuros disueltos mediante la ventilación continua del ácido sulfhídrico liberado desde el agua residual hasta que la lectura de este sea nula mediante la renovación del aire. De la misma manera que se dimensionan las chimeneas para tales fines, se presentan las distintas simulaciones adaptadas al material de laboratorio y equipos con los que se contaba para hacer las pruebas, estas simulaciones se han obtenido al variar la sección de la sonda con la que se extraen los gases, así como el volumen del recipiente que contiene la muestra. Una vez conocidos estos parámetros se pueden calcular la velocidad y las renovaciones por hora entre otros valores.

Bajo este planteamiento se presentan los tratamientos o simulaciones en la tabla 3.15 y para aclarar las características que se dan en cada uno de ellos se presenta la tabla 3.16.

Ventilación		Renovaciones		Ventilación		Renovaciones	
Extracción	<b>ch1</b>	Renovaciones	16,00	Extracción	<b>ch7</b>	Renovaciones	8,00
Extracción	<b>ch2</b>	Renovaciones	21,33	Extracción	<b>ch8</b>	Renovaciones	10,67
Extracción	<b>ch3</b>	Renovaciones	26,67	Extracción	<b>ch9</b>	Renovaciones	13,33
Extracción	<b>ch4</b>	Renovaciones	12,00	Extracción	<b>ch10</b>	Renovaciones	4,80
Extracción	<b>ch5</b>	Renovaciones	16,00	Extracción	<b>ch11</b>	Renovaciones	6,40
Extracción	<b>ch6</b>	Renovaciones	20,00	Extracción	<b>ch12</b>	Renovaciones	8,00

Tabla 3.15 Notación de los ensayos en función de la tasa de renovación.

Tratamiento	ch1	ch2	ch3	ch4	ch5	ch6	ch7	ch8	ch9	ch10	ch11	ch12
<b>Volumen total (L)</b>	1,50	1,50	1,50	2,00	2,00	2,00	3,00	3,00	3,00	5,00	5,00	5,00
<b>Diámetro sonda (mm)</b>	3,00	4,00	5,00	3,00	4,00	5,00	3,00	4,00	5,00	3,00	4,00	5,00
<b>Renovaciones por hora</b>	16,00	21,33	26,67	12,00	16,00	20,00	8,00	10,67	13,33	4,80	6,40	8,00
<b>Volumen de agua (L)</b>	0,38	0,38	0,38	0,50	0,50	0,50	0,75	0,75	0,75	1,25	1,25	1,25
<b>Velocidad chimenea (m/s)</b>	0,46	0,61	0,76	0,34	0,46	0,57	0,23	0,30	0,38	0,14	0,18	0,23
<b>Caudal de aspiración (L/min)</b>	18,00	24,00	30,00	18,00	24,00	30,00	18,00	24,00	30,00	18,00	24,00	30,00
<b>Volumen de aire (L)</b>	1,13	1,13	1,13	1,50	1,50	1,50	2,25	2,25	2,25	3,75	3,75	3,75

Tabla 3.15 Distintos supuestos de ventilación de aire

Este ensayo se ha desarrollado en 3 fases, que se irán desarrollando a continuación.

### 3.2.1. Estudio de la eliminación de sulfuros en muestras mediante ventilación.

Se procedió a la medida de manera conjunta de la cantidad de ácido sulfhídrico que se extraía del aire contenido en el interior del envase y la concentración de sulfuros disueltos en el agua, estos valores serían comparados con las lecturas realizadas en cuanto a sulfuros disueltos se refiere antes de tratar el agua, con el objetivo de ver la eficiencia del método en cuanto a la eliminación de sulfuros.

Para tales fines se han utilizado muestras de agua residual bruta procedentes de la zona de la costa (EBAR “Las Gaviotas”, La Manga del Mar Menor), durante la

temporada invierno 2012. Estas muestras han estado refrigeradas hasta el momento en que han sido analizadas para conservar sus propiedades, excepto cuando presentaban un contenido bajo de ácido sulfhídrico que se dejaban madurar a temperatura ambiente hasta que conseguían unos niveles adecuados. Las muestras se han tomado en diferentes momentos a lo largo de varios días y por lo tanto presentan una composición muy diversa.

Nº ensayo	Ácido Sulfhídrico inicial [ppm]/h	Ácido Sulfhídrico final [ppm]/h	Ácido Sulfhídrico extraído [ppm]/h	Ácido Sulfhídrico extraído [mg/Lh]	Sulfuros iniciales [mg/Lh]	Sulfuros finales [mg/Lh]
<b>Muestra 1</b>						
ch7	349	24	6598	9,2	15	2
ch9	231	12	4809	6,7	10	2
ch4	210	27	7343	10,2	10	1
ch6	250	6	5545	7,7	11	0,1
ch3	251	0,3	4675	6,5	11	0
ch1	219	0	3267	4,5	10	0
ch10	87	0	1130	1,6	8	0
<b>Muestra 2</b>						
ch12	196	4,9	3832	5,3	10	0,2
ch11	183	0	3551	4,9	11	0
ch8	124	0	1643	2,3	11	0,6
ch5	62	0	397	0,5	3	0
ch2	14	0	59	0,1	1	0
<b>Muestra 3</b>						
ch3	65	0	389	0,5	4	0
ch4	40	0	322	0,4	3	0
ch5	38	0	475	0,6	3	0
ch1	107	0	754	1	9	0,1
ch2	84	0	796	1,1	8	0,1
ch3	170	0	4676	6,5	10	0,1
ch7	24	0	387	0,5	1	0

Tabla 3.17 Medidas de los compuestos reducidos del azufre.

En la tabla 3.17 se presentan los resultados que se han obtenido en las muestras tras haber aplicado los diferentes tratamientos de ventilación, identificándose cada uno de ellos por un código (ch). Los resultados muestran la variación en el contenido de sulfuros disueltos tras aplicar un caudal constante de ventilación de gases durante 1 hora.

La cantidad de ácido sulfhídrico eliminado que se muestra, ha sido determinada con las lecturas realizadas cada minuto, conociendo como evolucionan los valores de concentración de éste gas a lo largo del tiempo y el caudal que se extrae del mismo, se ha calculado la concentración extraída como el área bajo la curva descrita por las lecturas de ácido sulfhídrico o dicho de otra manera como el sumatorio de la concentración del gas que se elimina en cada minuto a lo largo de 1 hora, tiempo de duración del ensayo.

Los resultados mostrados en la tabla 3.17 se encuentran representados en el anexo II de manera individual para cada muestra, donde los gráficos describen la evolución del contenido de ácido sulfhídrico que se extrae durante la hora de tratamiento.

Al observar los resultados se puede comprobar como cuantas más renovaciones de aire realizadas a la hora, mayor cantidad de ácido sulfhídrico es eliminado, habiendo más posibilidades de que se agoten los sulfuros disueltos. Aun así se también se puede observar como en las pruebas con un bajo número de renovaciones por hora también se ha conseguido un resultado satisfactorio, por ello se puede afirmar que asegurando una velocidad mínima de ventilación del aire en contacto con el agua residual de 0,14 m/s o bien unas 5 renovaciones del aire a la hora se puede eliminar un contenido de 8 mg/l de sulfuros disueltos.

A continuación se presenta la figura 3.21 donde aparecen las medidas de sulfuros disueltos antes y después del tratamiento de ventilación donde se puede observar el agotamiento de los sulfuros mediante la ventilación de aire, de esta manera se puede comprobar como en la inmensa mayoría de las pruebas se eliminan los sulfuros disueltos por medio de la liberación de ácido sulfhídrico a la atmósfera, cumpliéndose que la ventilación de gases ayuda a desplazar el equilibrio existente entre las formas  $H_2S$  y  $HS^-$  disueltas en el agua, agotándose el  $H_2S$  y así los sulfuros disueltos.

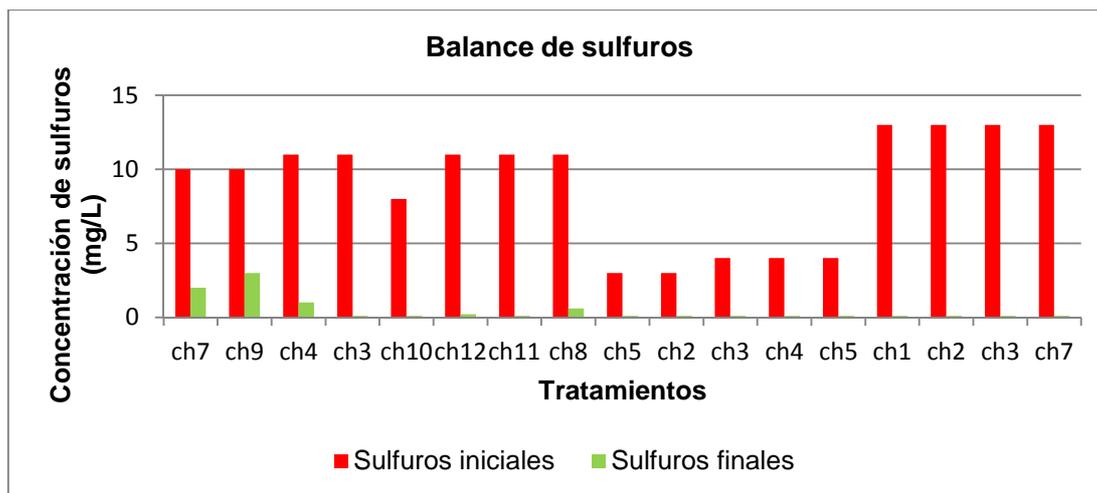


Figura 3.21 Medida de los sulfuros disueltos.

### 3.2.2. Estudio de la eliminación de sulfuros y sulfitos en muestras mediante ventilación.

En la segunda parte del ensayo se quiso ampliar el número de parámetros medidos para conocer el comportamiento que tenían estos frente a la ventilación de aire, de tal manera además de la medida de ácido sulfhídrico y sulfuros disueltos, también se midieron sulfitos y sulfatos, el interés por conocer la concentración de estos compuestos reside en la oxidación que se produce con la inyección de aire, donde los sulfuros pasaran a la forma de sulfitos antes de oxidarse por completo a sulfatos. Para llevar a cabo el ensayo se utilizaron muestras de agua residual bruta procedentes de la zona de la costa (EBAR “Las Gaviotas”, La Manga del Mar Menor), durante la temporada primavera 2012. Al igual que anteriormente las muestras gozaban de gran heterogeneidad y se utilizaban cuando alcanzaban unas concentraciones altas de ácido sulfhídrico, que indicaba que el agua residual se encontraba en unas condiciones muy reductoras. El esquema del ensayo es el que se mostró en la figura 3.20, donde el agua residual era sometida a los 12 tratamientos de ventilación posibles, obteniendo los resultados que se muestran en la tabla 3.18.

Nº ensayo	Sulfuros	Sulfuros	Sulfitos	Sulfitos	Sulfatos	Sulfatos
	iniciales	finales	iniciales	iniciales	iniciales	finales
	[mg/Lh]	[mg/Lh]	[mg/Lh]	[mg/Lh]	[mg/Lh]	[mg/Lh]
ch1	12	0	40	20	600	600
ch2	6	0	60	15	450	360
ch2	4	0	25	0	340	340
ch2	30	0	125	20	400	500
ch3	16	0	60	14	310	310
ch3	30	5	150	20	300	300
ch3	20	0	100	5	350	350
ch3	35	5	100	20	450	350
ch4	12	0	40	0	600	600
ch4	50	40	175	150	175	175
ch5	10	0	40	5	400	400
ch5	1,2	0	10	2	370	370
ch5	30	0	125	20	400	500
ch6	28	1,2	104	20	480	520
ch6	12	0	36	4	320	340
ch6	20	0	100	10	350	350
ch6	35	0	100	10	450	500
ch6	25	0	125	20	500	500
ch7	50	20	150	30	250	300
ch7	25	0	120	15	470	480
ch8	10	0	120	80	250	250
ch8	30	8	175	120	175	175
ch8	30	0	100	10	350	350
ch9	28	4	40	5	400	400
ch9	20	0	100	25	450	420
ch9	35	7	150	30	500	500
ch10	30	10	130	60	250	250
ch11	8	0	28	4	430	256
ch11	30	10	120	80	250	250
ch11	25	0	120	80	450	450
ch12	24	20	100	80	400	300
ch12	12	0	36	2	320	340
ch12	20	0	100	10	350	350
ch12	35	10	100	50	450	400

Tabla 3.18 Medidas de compuestos con azufre.

Para simplificar la interpretación de los resultados se representan a continuación en las siguientes figuras.

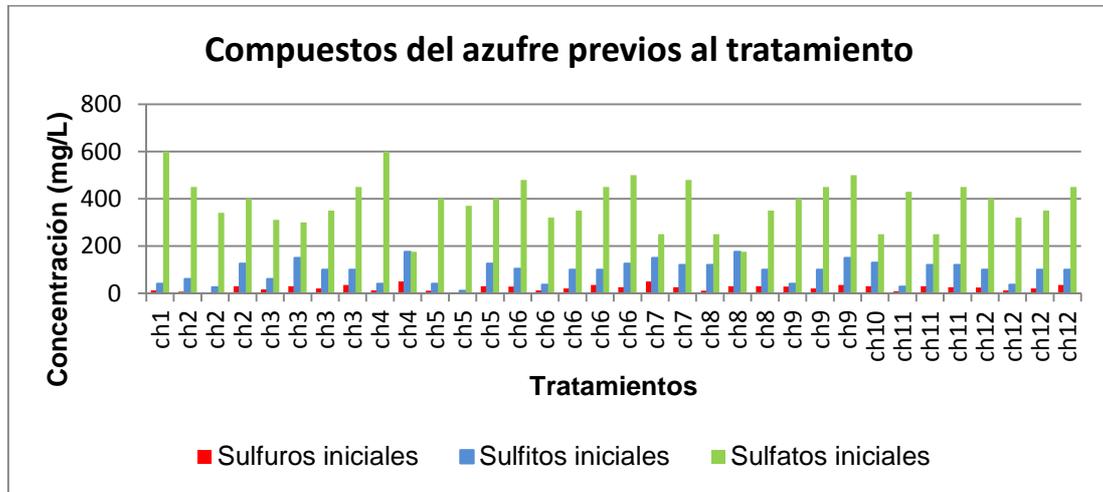


Figura 3.22 Medida de los compuestos del azufre previos al tratamiento

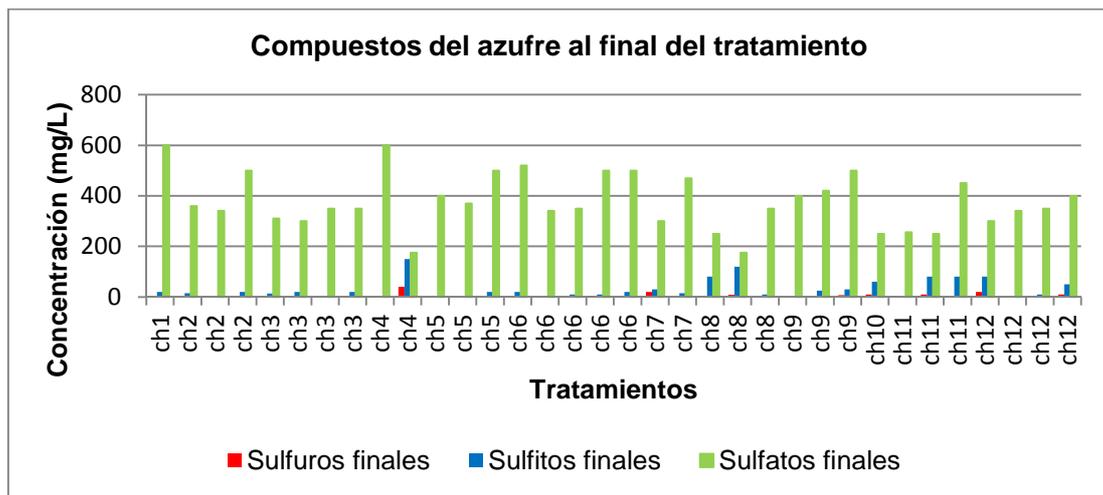


Figura 3.23 Medida de los compuestos del azufre al final del tratamiento

Al comparar las figuras 3.22 y 3.23, se observa como con el tratamiento de ventilación hay una importante variación en las medidas de los sulfuros y los sulfitos, para facilitar esta interpretación se grafican a continuación las lecturas iniciales y finales para cada uno de los compuestos medidos.

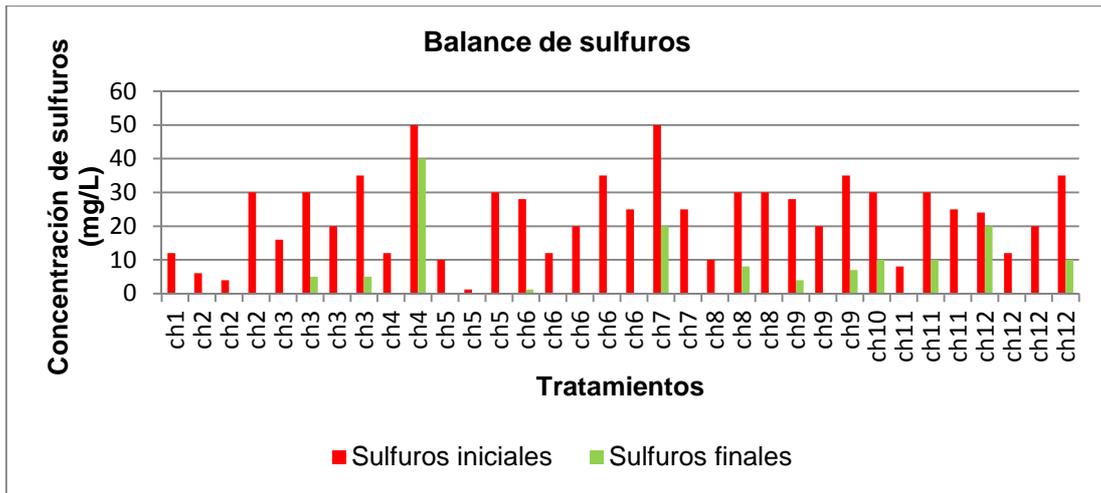


Figura 3.24 Balance de sulfuros

Los resultados muestran como los sulfuros disueltos son eliminados en la mayoría de los tratamientos, siendo estos tratamientos menos efectivos cuanto menor es el número de renovaciones por hora.

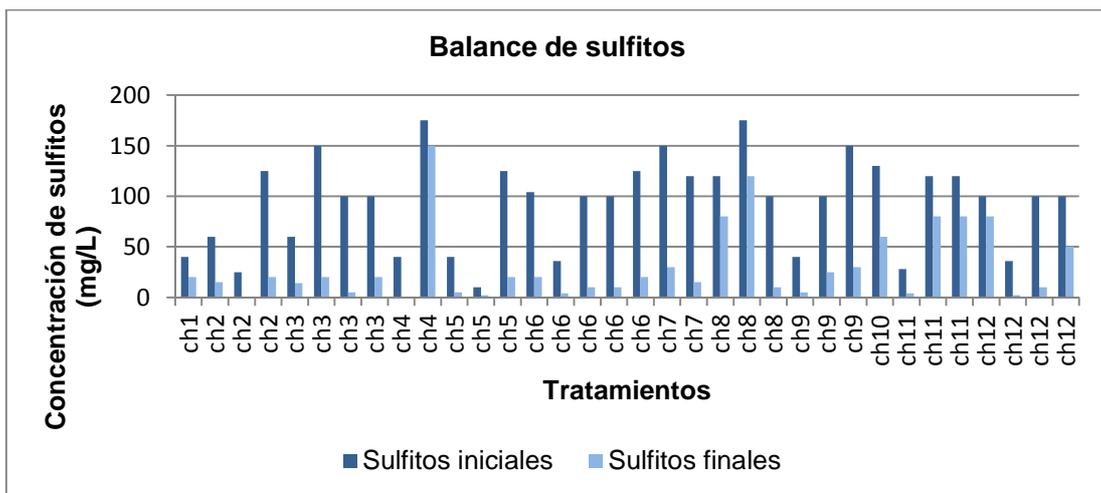


Figura 3.25 Balance se sulfitos

El comportamiento de los sulfitos es más complejo dándose un gran descenso de estos en algunos tratamientos de ventilación como son ch2, ch3 y ch6 donde se realizan 21, 26 y 20 renovaciones a la hora respectivamente.

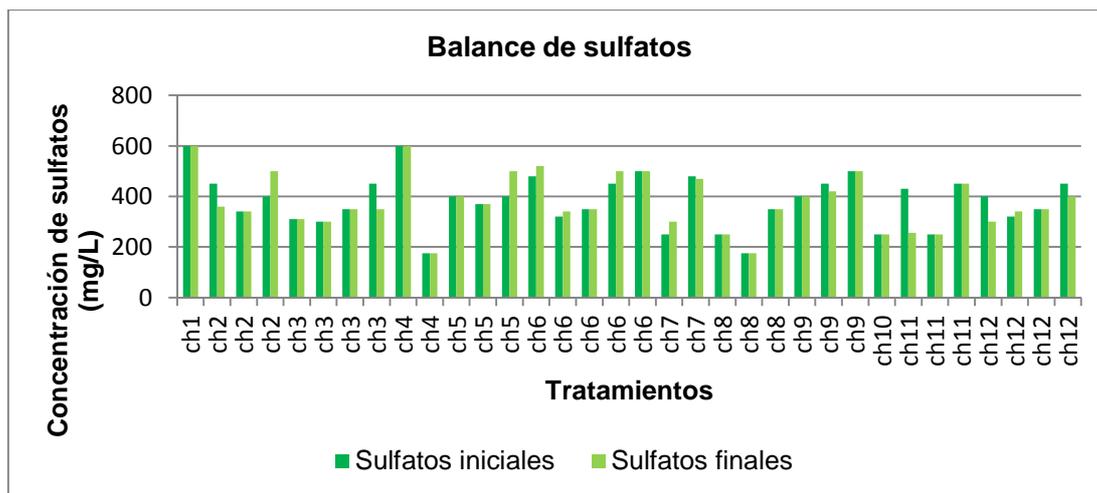


Figura 3.26 Balance de sulfatos

Las medidas de los sulfatos permanecen prácticamente sin variación tras el tratamiento de ventilación. En cuanto a la eficiencia del tratamiento de ventilación, se observa cuanto la tasa de renovaciones aplicada es mayor se obtienen una mayor eliminación de los sulfuros, encontrando que para muestras con un contenido inicial en torno a 30 mg/L se hace necesario aplicar unas 20 renovaciones a la hora, mientras que si el contenido se aproxima a los 10 mg/L bastará con aplicar 6 renovaciones a la hora.

### 3.2.3. Estudio de la eliminación de compuestos reducidos de azufre en muestras mediante ventilación y su balance de masas

Para finalizar el ensayo, se planteó llevar a cabo un balance de masas con el fin de conocer las transformaciones que se dan en el agua residual al aplicar el tratamiento de ventilación.

Tanto las aguas residuales brutas como las depuradas pueden contener diferentes compuestos de azufre. Existen, al menos, 30 especies posibles inorgánicas de azufre, ya sean iónicas o moleculares. Sin embargo solo 6 de ellas son termodinámicamente estables a temperatura ambiente: bisulfato ( $\text{HSO}_4^-$ ), sulfato ( $\text{SO}_4^{2-}$ ), azufre ( $\text{S}^0$ ), ácido sulfhídrico ( $\text{H}_2\text{S}$ ), bisulfuro ( $\text{HS}^-$ ) y sulfuro ( $\text{S}^{2-}$ ) (Rubin, 1974).

Algunos compuestos tales como los tiosulfatos son relativamente inestables por lo que se suelen encontrar en bajas concentraciones. Los sulfitos se suelen encontrar en las aguas residuales industriales y el azufre inorgánico entra a formar parte del sistema celular de muchos microorganismos (Jocelyn, 1972 y Burns, 1975).

En el agua residual se dan diferentes reacciones según el estado en que se encuentre, dándose reacciones de oxidación cuando llega oxígeno al agua y de reducción cuando las condiciones son anaerobias.

Sabiendo que los compuestos de azufre que se encuentran en mayor proporción disueltos en el agua son los sulfatos como compuestos oxidados, sulfuros como compuestos reducidos y como compuestos de oxidación intermedia sulfitos y tiosulfatos.

Se propuso para el siguiente análisis, el estudio de sulfatos, sulfuros, sulfitos y tiosulfatos, realizando unas medidas previas a la realización del tratamiento de ventilación y otras posteriores, de tal manera que se pudieran cuadrar las entradas y las salidas de azufre teniendo en cuenta el ácido sulfhídrico liberado. En la elaboración del balance de azufre se decidió desestimar la medida de los sulfitos debido a que en el método de determinación además de incluir los tiosulfatos como sulfitos, se crean interferencias con otros compuestos, dando una idea exagerada del contenido real.

El número de tratamientos de ventilación fue reducido a 4, estos fueron ch3, ch6, ch9 y ch12, correspondiendo estos con 26, 20, 13 y 8 renovaciones de aire a la hora., obteniendo los resultados que se presentan a continuación en la tabla 3.19.

<b>Muestras</b>	<b>Sulfuros [mg/Lh]</b>	<b>Sulfitos [mg/Lh]</b>	<b>Sulfatos [mg/Lh]</b>	<b>Tiosulfatos [mg/Lh]</b>
<b>Muestra A</b>	20	50	273,8	30
Ch3	0	10	287,5	5
Ch6	0	10	287,5	5
Ch9	2	14	360	15
Ch12	8	23	360	20
<b>Muestra B</b>	30	40	261,5	40
Ch3	2	13	273	20
Ch6	3	10	271,3	20
Ch9	8	25	280,3	25
Ch3	8	40	280	35
<b>Muestra C</b>	35	70	148,63	70
Ch3	8	30	175	40
Ch6	8	25	177,6	45
Ch9	12	50	175	50
Ch3	20	70	174,15	50
<b>Muestra D</b>	35	125	240	75
Ch3	4	25	270,8	35
Ch9	8	0	295,5	40
Ch12	15	60	276	60
<b>Muestra E</b>	70	150	185	125
Ch3	30	80	208	80
Ch9	35	100	205	100
Ch12	50	125	200	120

Tabla 3.19 Concentraciones de los diferentes compuestos medidos

Los resultados mostrados en la tabla 3.19 muestran las medidas realizadas de sulfatos, sulfitos, sulfuros y tiosulfatos para el agua sin tratar y para cada tratamiento de ventilación.

<b>Muestras</b>	<b>[S] Sulfuros [mg/L]</b>	<b>[S] Sulfitos [mg/L]</b>	<b>[S] Sulfatos [mg/L]</b>	<b>[S] Tiosulfatos [mg/L]</b>
<b>Muestra A</b>	20	20,0	91,5	17,2
<b>Ch3</b>	0	4,0	96,0	2,9
<b>Ch6</b>	0	4,0	96,0	2,9
<b>Ch9</b>	1	5,6	120,2	8,6
<b>Ch12</b>	8	9,2	120,2	11,4
<b>Muestra B</b>	30	16,0	87,3	22,9
<b>Ch3</b>	1	5,2	91,2	11,4
<b>Ch6</b>	0,2	4,0	90,6	11,4
<b>Ch9</b>	8	10,0	93,6	14,3
<b>Ch3</b>	10	16,0	93,5	20,0
<b>Muestra C</b>	35	28,1	49,6	40,1
<b>Ch3</b>	8	12,0	58,5	22,9
<b>Ch6</b>	8	10,0	59,3	25,7
<b>Ch9</b>	12	20,0	58,5	28,6
<b>Ch3</b>	20	28,1	58,2	28,6
<b>Muestra D</b>	35	50,1	80,2	42,9
<b>Ch3</b>	4	10,0	90,5	20,0
<b>Ch9</b>	8	0,0	98,7	22,9
<b>Ch12</b>	15	24,0	92,2	34,3
<b>Muestra E</b>	70	60,1	61,8	71,5
<b>Ch3</b>	30	32,1	69,5	45,8
<b>Ch9</b>	35	40,1	68,5	57,2
<b>Ch12</b>	50	50,1	66,8	68,7

Tabla 3.20 Concentración de azufre correspondiente a los compuestos medidos

Los resultados mostrados en la tabla 3.20 muestran las concentraciones de azufre correspondientes a las medidas realizadas de sulfatos, sulfitos, sulfuros y tiosulfatos en el agua sin tratar y para cada tratamiento de ventilación.

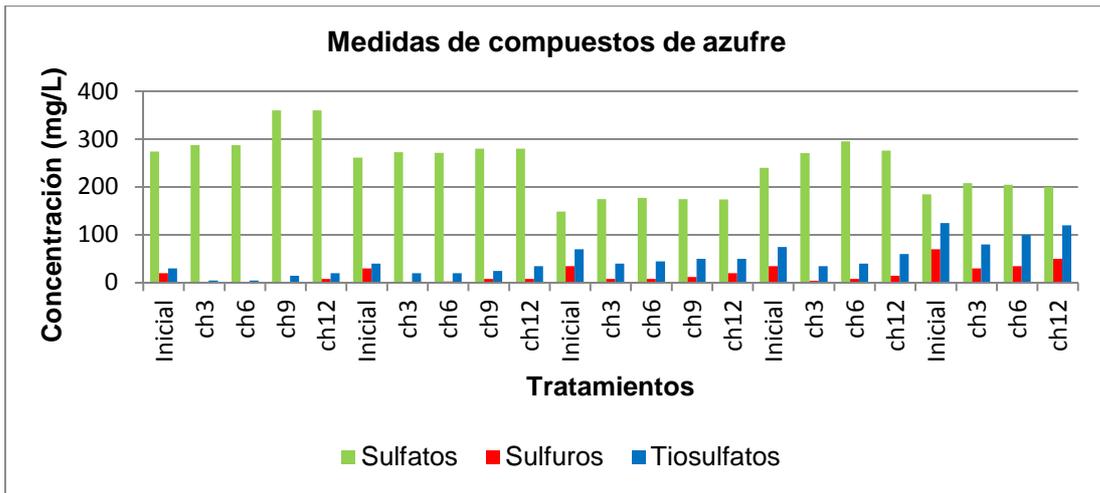


Figura 3.27 Balance de compuestos de azufre

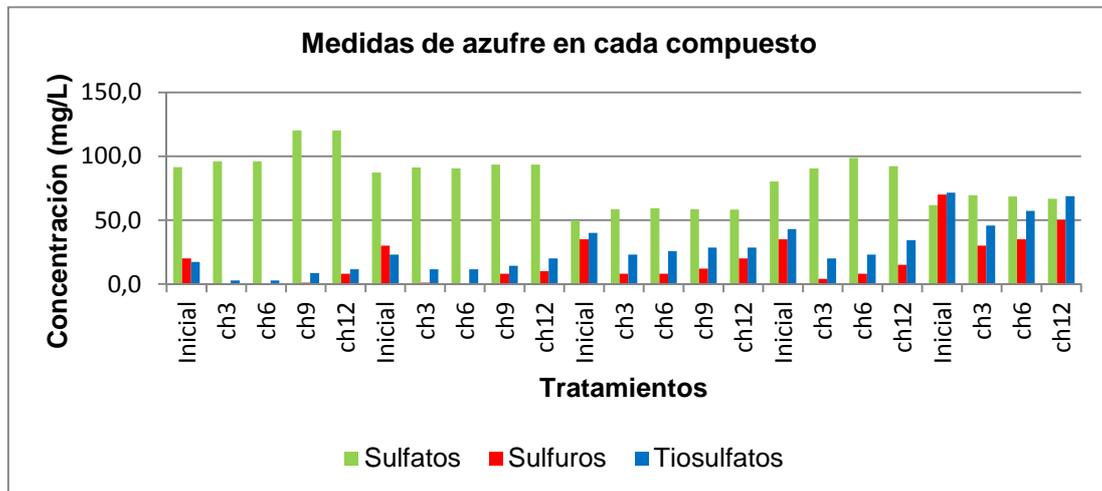


Figura 3.28 Balance de compuestos de azufre

En la figura 3.27 se muestra como varían las mediciones realizadas de sulfatos, sulfuros y tiosulfatos, mientras que en la figura 3.28 aparecen las concentraciones de azufre correspondientes a cada compuesto que se ha medido, se representa primero el agua sin tratar seguida de los diferentes tratamientos de ventilación aplicados. En cuanto al contenido de compuestos reducidos de azufre medidos (sulfuros y tiosulfatos) se comprueba que a mayor número de renovaciones menores son las medidas de dichos compuestos y así se consigue mejorar las condiciones del agua.

A continuación se presenta el balance de masas para cada muestra, donde aparecen los diferentes compuestos que se han medido, presentándose las concentraciones de los compuestos y sus equivalencias en cuanto al contenido de azufre, estando las entradas del balance formadas por los azufres que corresponden a los sulfuros, sulfatos y tiosulfatos, mientras que en las salidas se contabilizan a los azufres que corresponden a los sulfuros, sulfatos, tiosulfatos y ácido sulfhídrico eliminado.

Muestra A	Inicial	ch3	ch6	ch9	ch12
H <sub>2</sub> S eliminado en el compuesto (mg/L)	-	6	6	6	10
H <sub>2</sub> S eliminado como azufre (mg/L)	-	6	6	6	10
H <sub>2</sub> S final en el compuesto (mg/L)	-	0	0	0	0
H <sub>2</sub> S final como azufre (mg/L)	-	0	0	0	0
Sulfuros en el compuesto (mg/L)	20	0	0	2	8
Sulfuros como azufre (mg/L)	20	0	0	1	8
Sulfatos en el compuesto (mg/L)	274	288	288	360	360
Sulfatos como azufre (mg/L)	91	96	96	120	120
Tiosulfatos en el compuesto (mg/L)	30	5	5	15	20
Tiosulfatos como azufre (mg/L)	17	3	3	9	11

Tabla 3.21 Balance de masas para la muestra A

Muestra A	Salidas			
Entradas (mg/L)	ch3	ch6	ch9	ch12
129	104	104	136	149
Diferencia	24	24	-7	-21

Tabla 3.22 Resultados del balance de masas para la muestra A

Muestra B	Inicial	ch3	ch6	ch9	ch12
H <sub>2</sub> S eliminado en el compuesto (mg/L)		12	12	13	15
H <sub>2</sub> S eliminado como azufre (mg/L)		11	11	12	14
H <sub>2</sub> S final en el compuesto (mg/L)		0	0	0	0
H <sub>2</sub> S final como azufre (mg/L)		0	0	0	0
Sulfuros en el compuesto (mg/L)	30	2	3	8	8
Sulfuros como azufre (mg/L)	30	1	0	8	10
Sulfatos en el compuesto (mg/L)	262	273	271	280	280
Sulfatos como azufre (mg/L)	87	91	91	94	94
Tiosulfatos en el compuesto (mg/L)	40	20	20	25	35
Tiosulfatos como azufre (mg/L)	23	11	11	14	20

Tabla 3.23 Balance de masas para la muestra B

Muestra B	Salidas			
Entradas (mg/L)	ch3	ch6	ch9	ch12
140	115	113	128	138
Diferencia	26	27	12	3

Tabla 3.24 Resultados del balance de masas para la muestra B

Muestra C	Inicial	ch3	ch6	ch9	ch12
H <sub>2</sub> S eliminado en el compuesto (mg/l)		16	17	17	19
H <sub>2</sub> S eliminado como azufre (mg/l)		15	16	16	18
H <sub>2</sub> S final en el compuesto (mg/l)		0	0	0	0
H <sub>2</sub> S final como azufre (mg/l)		0	0	0	0
Sulfuros en el compuesto (mg/l)	35	8	8	12	20
Sulfuros como azufre (mg/l)	35	8	8	12	20
Sulfatos en el compuesto (mg/l)	149	175	178	175	174
Sulfatos como azufre (mg/l)	50	58	59	58	58
Tiosulfatos en el compuesto (mg/l)	70	40	45	50	50
Tiosulfatos como azufre (mg/l)	40	23	26	29	29

Tabla 3.25 Balance de masas para la muestra C

Muestra C	Salidas			
Entradas (mg/l)	ch3	ch6	ch9	ch12
125	104	109	115	124
Diferencia	21	16	10	0

Tabla 3.26 Resultados del balance de masas para la muestra C

Muestra D	Inicial	ch3	ch9	ch12
H <sub>2</sub> S eliminado en el compuesto (mg/L)		20	17	13
H <sub>2</sub> S eliminado como azufre (mg/L)		19	16	12
H <sub>2</sub> S final en el compuesto (mg/L)		0	0	0
H <sub>2</sub> S final como azufre (mg/L)		0	0	0
Sulfuros en el compuesto (mg/L)	35	4	8	15
Sulfuros como azufre (mg/L)	35	4	8	15
Sulfatos en el compuesto (mg/L)	240	271	296	276
Sulfatos como azufre (mg/L)	80	90	99	92
Tiosulfatos en el compuesto (mg/L)	75	35	40	60
Tiosulfatos como azufre (mg/L)	43	20	23	34

Tabla 3.27 Balance de masas para la muestra D

Muestra D	Salidas		
Entradas (mg/L)	ch3	ch9	ch12
158	134	145	154
Diferencia	24	13	5

Tabla 3.28 Resultados del balance de masas para la muestra D

Muestra E	Inicial	ch3	ch9	ch12
H <sub>2</sub> S eliminado en el compuesto (mg/L)		31	43	52
H <sub>2</sub> S eliminado como azufre (mg/L)		29	40	49
H <sub>2</sub> S final en el compuesto (mg/L)		0	0	1
H <sub>2</sub> S final como azufre (mg/L)		0	0	1
Sulfuros en el compuesto (mg/L)	70	30	35	50
Sulfuros como azufre (mg/L)	70	30	35	50
Sulfatos en el compuesto (mg/L)	185	208	205	200
Sulfatos como azufre (mg/L)	62	69	68	67
Tiosulfatos en el compuesto (mg/L)	125	80	100	120
Tiosulfatos como azufre (mg/L)	72	46	57	69

Tabla 3.29 Balance de masas para la muestra D

Muestra E	Salidas		
Entradas (mg/L)	ch3	ch9	ch12
203	174	201	235
Diferencia	29	2	-31

Tabla 3.30 Resultados del balance de masas para la muestra E

Los resultados obtenidos con los balances de azufre no cuadran completamente, quedando por determinar azufres que no se habían medido en la forma de los compuestos estudiados, esto se puede deber a varios motivos. Dada la complejidad que presenta la química del azufre, ya que la especiación del azufre varía mucho en función de potenciales redox, pH, fuerzas iónicas entre otros y que por tanto hace muy difícil la elección de los compuestos a medir y crear un balance completo para el azufre. Cuando el agua residual tiene un contenido de oxígeno disuelto muy bajo o nulo, se dan unas reacciones típicas entre la que se encuentra la siguiente reacción.



En esta reacción se muestra como es posible que se produzca la formación de azufre libre, que quedaría sin haber sido determinado en este ensayo. Además en el agua residual hay pequeñas cantidades de metales pesados que se pueden combinar con el azufre libre formando sulfuros metálicos insolubles (Brisbane City Council, 1980), como resultado pequeñas cantidades de azufre pueden combinarse con iones de metales pesados disponibles para formar compuestos insolubles (Tech. Stand. Committe, 1989), por lo que no se podrían haber medido mediante el método empleado por el kit de determinación de sulfuros.

Entre el 70-90% de los sulfuros se encuentran disueltos en el agua residual, es decir en forma soluble, mientras que el resto esta constituido por especies suspendidas y precipitadas, esta fracción variará según la concentración de metales pesados que contenga el agua residual. Por otro lado hay que tener en cuenta la exactitud de los métodos de medida de los compuestos que se han utilizado, que puede llegar a suponer el 10% de la medida, que junto con la baja estabilidad de los compuestos de reducción intermedia dificultan la medida. Para concluir hay que señalar la importancia del ensayo para demostrar como el uso de chimeneas en colectores de gravedad puede ser una buena alternativa para renovar el aire del alcantarillado y mantener el agua con los mínimos niveles de sulfuros disueltos.

### **3.3. Estudio de la inyección de aire a presión en tuberías de impulsión**

Es en las conducciones de impulsión donde se generan las mayores concentraciones de sulfuros debido a la imposibilidad de captar el oxígeno, Resultando éste un punto crítico en el que es muy importante prevenir dicha formación de sulfuros. La inyección directa de aire comprimido en las tuberías de impulsión para controlar la generación de sulfuros ha sido practicada ampliamente (N. Tanaka et al, 1995), además se ha comprobado que incrementando la presión en las tuberías de impulsión se consiguen grandes cantidades de oxígeno disuelto en el flujo (Takatoshi Ochi et al, 1998).

Con el fin de evitar que aparezcan condiciones anaerobias y con ello la generación de sulfuros y solucionar así los problemas causados por la formación de ácido sulfhídrico que se dan en las tuberías de impulsión, se han realizado una serie de ensayos basados en la introducción de aire comprimido directamente al flujo de agua de una serie de tuberías de impulsión, con la particularidad de que todas ellas eran de polietileno, este aspecto se debe resaltar pues el uso de esta técnica no esta recomendado para su aplicación en tuberías de fundición dúctil.

El objetivo perseguido tenía como fin provocar la oxidación de los sulfuros presentes en el agua residual así como prevenir la generación de los mismos al modificar el contenido de oxígeno disuelto y conseguir unas condiciones aerobias.

El primer paso en el diseño de un sistema de inyección de aire es estimar los requerimientos deseados para alcanzar los objetivos del control de sulfuros, lo que se basa en la tasa de consumo de oxígeno esperada en la tubería. Estudios anteriores realizados en tuberías indican que las muestras de agua residual recogidas tienen unas tasas de consumo de oxígeno del orden de 2-3 mg/Lh hasta 20 mg/L h (Boon y Lister, 1975) como consumo de oxígeno disuelto en el seno del agua residual, y respecto a la película biológica 0,7 g/m<sup>2</sup>h a 15°C (Boon y Lister, 1975) y 1,4 g/m<sup>2</sup>h a 23 °C y 2,2 m/s (Pomeroy y Parkhurst, 1972).

El oxígeno consumido en el agua residual se determina experimentalmente, realizando medidas en la tubería a estudiar. El periodo de muestreo debe cubrir todas las variaciones y tener en cuenta los casos más desfavorables. Se pueden emplear diferentes aproximaciones para estimar los requerimientos de aire para el control de sulfuros en diferentes conducciones, para ello se determina la tasa de oxígeno consumida y la curva de consumo de oxígeno, como se muestran en las figuras 3.30 y 3.31.

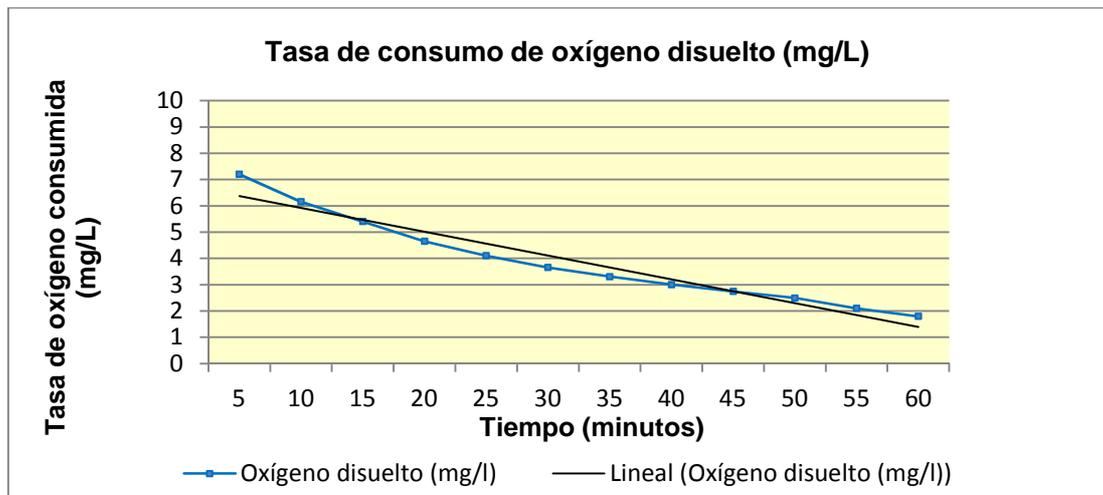


Figura 3.30 Tasa de oxígeno consumida inicialmente en muestras medidas en el laboratorio con atmósfera de aire

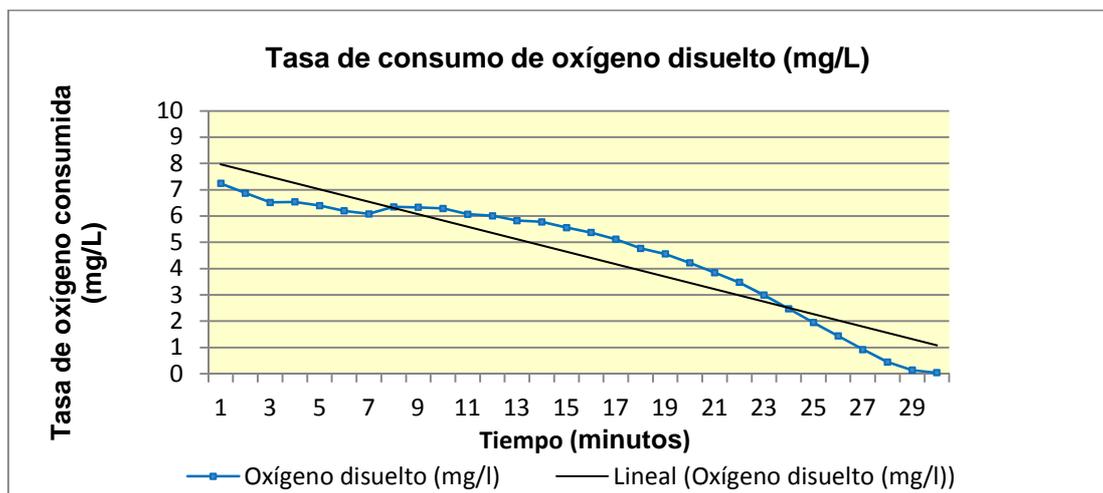


Figura 3.31 Tasa de oxígeno consumida inicialmente en muestras medidas en una tubería de impulsión.

Las medidas realizadas primero en el laboratorio para muestras con atmósfera de aire y mas tarde en campo muestran una tasa de consumo de oxígeno que viene dada por la pendiente de la recta, resultando ser 5,5 mg/L h para las medidas realizadas en el

laboratorio, mientras que para las medidas en campo la tasa de consumo de oxígeno se encuentra en torno a 15 mg/L h. Hay que tener en cuenta que las medidas que se llevaron en el laboratorio carecían de una capa de biofilm, además de que en ellas se producía una aireación puesto que estaban en contacto con la atmósfera y que por tanto, puede justificar la diferencia encontrada entre ambas medidas.

Conocida la tasa de consumo, se pueden calcular los requerimientos de aire en m<sup>3</sup>/min, para lo que nos hemos basado en dos ecuaciones, la primera es la ecuación tomada de Process Design Manual for Sulfide Control in Sanitary Sewerage Systems, 1978.

$$Q_a = \frac{(17 \times 10^{-6}) V R_r}{P_1 \log [(P_1 + P_2) / P_1]} \times \frac{u_a + u_w}{u_a} \quad \text{Ecuación 3.2}$$

Dónde:

$Q_a$  = Flujo de aire necesario en una tubería a presión (m<sup>3</sup>/min)

$V$  = Volumen de la tubería (m<sup>3</sup>)

$R_r$  = Consumo de oxígeno en el agua residual (mg/L h)

$P_1$  = Presión atmosférica (atm)

$P_2$  = Presión en el punto de inyección (atm)

$u_a$  = Velocidad del aire en la tubería (m/s)

(1,66 d<sup>1/2</sup>, donde d = m de diámetro de la tubería)

$u_w$  = Velocidad del agua residual (m/s)

Aplicando la ecuación 3.2 con las características de una impulsión objeto de estudio, se obtiene que la inyección de aire debe suponer aproximadamente el 50% del agua bombeada.

La segunda ecuación se ha tomado de Tanaka, N. and K. Takenaka. Control of Hydrogen Sulfide and Degradation of Organic Matter by Air Injection a Wastewater Force Main, a continuación se describe la ecuación 3.3.

$$Q_G = \frac{Q_L}{0,319} \left[ \frac{60Q_L}{S \times L} (DO_T - DO_P) + 0,0015 \times COD_{sol} \times 1,10^{(t-20)} + 0,07 \right] \quad \text{Ecuación 3.3}$$

Dónde:

$Q_G$  = Flujo de aire necesario en una tubería a presión (m<sup>3</sup>/min)

$Q_L$  = Flujo de agua en una tubería a presión (m<sup>3</sup>/min)

$S$  = Área de la tubería (m<sup>2</sup>)

$L$  = Longitud de la tubería (m)

$DO_T$  = Concentración de oxígeno al final de la tubería de impulsión (mg/L)

$DO_P$  = Concentración de oxígeno al inicio de la tubería de impulsión (mg/L)

$COD_{sol}$  = Tasa de consumo de oxígeno (mg/L min)

$t$  = Temperatura del agua (°C)

Aplicando la ecuación 3.3 se obtiene en este caso que el porcentaje de aire respecto al agua bombeada debe ser del 25%. Estas ecuaciones predicen normalmente más aire del necesario para el control de sulfuros, basándose en mantener un exceso de oxígeno. En la inyección de aire que se ha llevado a cabo para este estudio el control de sulfuros se puede llevar a cabo usando una proporción menor de aire para satisfacer el consumo de oxígeno en el agua residual, bastando en algunos casos con inyectar un 10% del agua bombeada.

### **3.3.1. Estudio de la inyección de aire a presión en tuberías de impulsión en Alumbres**

En una primera fase se aplicó el tratamiento de inyección de aire comprimido sobre una impulsión de agua residual ubicada en el pueblo de Alumbres que pertenece al término municipal de Cartagena (Murcia), donde se llevaron a cabo medidas de oxígeno disuelto en el agua y del contenido en ácido sulfhídrico que se liberaba al aire.

A continuación se presenta la figura 3.31 donde se ilustra el ensayo, para realizarlo se instaló en la estación de bombeo un compresor que inyectaba aire comprimido sobre una tubería de diámetro 200 mm, el punto de inyección de aire se situó aguas abajo del bombeo en la clave de la tubería de impulsión, teniendo el trazado de esta línea una longitud de 1160 m, el agua bombeada hacia el punto de muestreo tiene que superar un desnivel y justo en el punto más alto a 60,5 metros de altitud, punto A, se instaló una chimenea donde se realizaron las medidas de ácido sulfhídrico, a continuación en el punto B se puso una segunda chimenea en la que se medía el contenido en oxígeno disuelto.

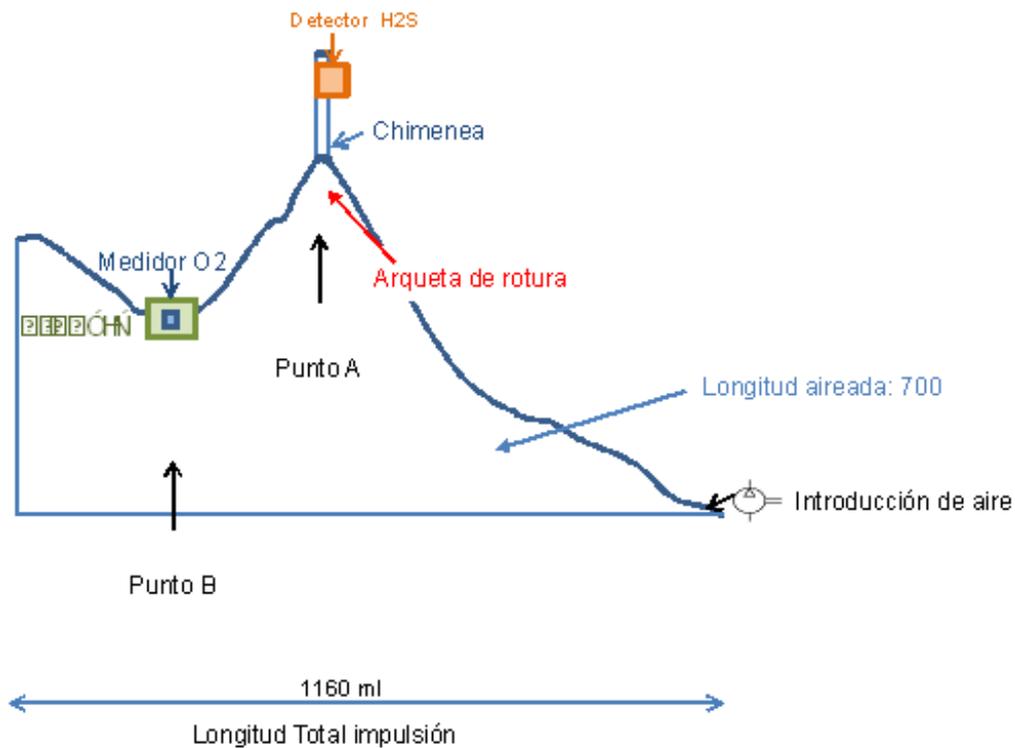


Figura 3.31 Perfil Longitudinal de la impulsión

Para el ensayo se utilizó como instrumentación un detector de gases DRÄGER X-am 5000 que se introdujo en el interior de la chimenea y un medidor multiparamétrico HANNA HI9828 que se instaló en el interior de una arqueta y cuya sonda medidora quedaba sumergida en el agua residual, ambos equipos se caracterizan por tener la capacidad de almacenar las lecturas que registran y que serán enviadas al ordenador. La introducción de aire se llevó a cabo con un grupo compresor de pistón de aire estacionario modelo: COMBA 250R III, habiendo sido instalado en la estación de

bombeo, inyectaba el aire a través de una tubería de 25 mm de diámetro sobre la clave de la tubería de 450 mm de diámetro.

Se estudiaron dos situaciones, en la primera se midió tanto el contenido en oxígeno disuelto en el agua residual como la concentración del ácido sulfhídrico en el aire que salía por la chimenea cuando el bombeo funcionaba en las condiciones habituales, es decir sin inyección de aire, mientras que en la segunda situación se realizaron las mismas medidas mientras que se inyectaba aire comprimido en la tubería de impulsión, estas medidas se representan gráficamente a continuación y de manera conjunta.

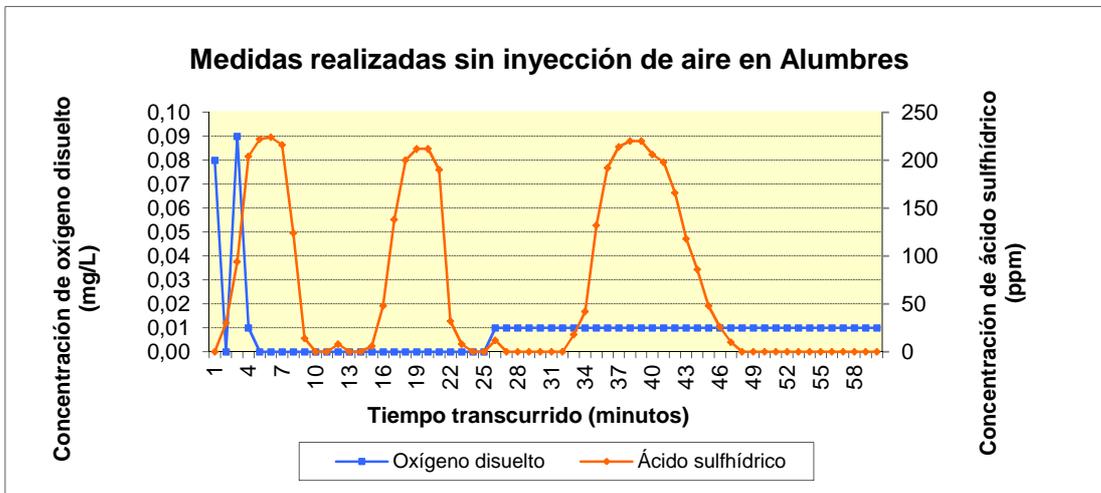


Figura 3.32 Concentración de oxígeno disuelto y ácido sulfhídrico sin inyección de aire en Alumbres.

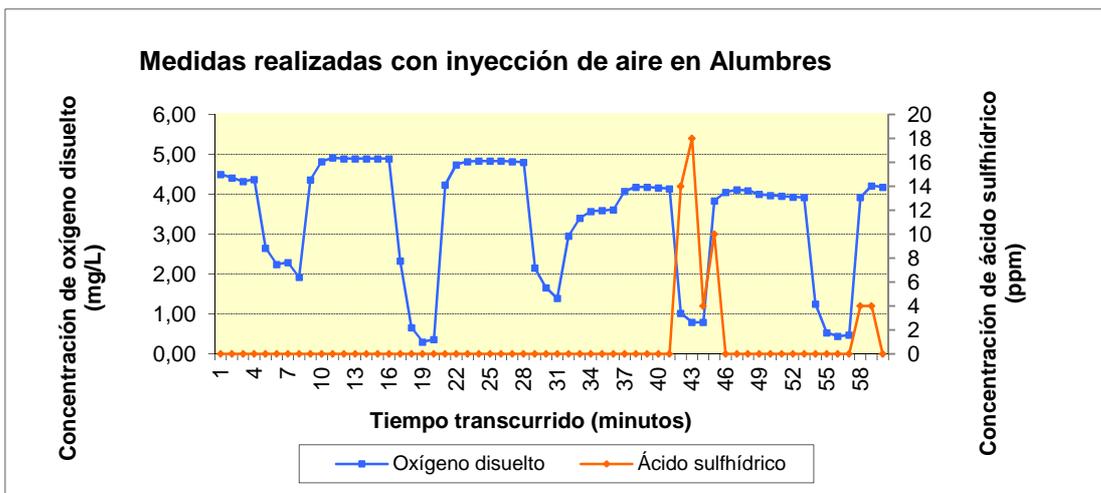


Figura 3.33 Concentración de oxígeno disuelto y ácido sulfhídrico con inyección de aire en Alumbres.

Como se puede observar los niveles de oxígeno disuelto previos a la inyección de aire son prácticamente nulos, mientras que cuando se inyecta aire comprimido se consiguen alcanzar niveles en torno a 4,5 mg/L de oxígeno disuelto. Los descensos en las medidas de oxígeno se deben a que el flujo de agua para ese instante no tenga la velocidad suficiente como para que el equipo de medición sea capaz de realizar una buena lectura o bien por problemas por la interferencia de algún sólido arrastrado en el agua y que puede bloquear durante unos instantes a la sonda de medición, este comportamiento se repite en varios puntos de muestreo que se verán más adelante.

En cuanto al contenido en ácido sulfhídrico, se aprecia claramente como los niveles de este gas se anulan cuando se inyecta el aire comprimido, mientras que cuando se prescinde de la inyección se llegan a alcanzar valores en torno a los 200 ppm, en la figura 3.32 se muestra como estos valores descienden con la parada de las bombas y por consiguiente la parada del flujo de agua.

En el anexo III, correspondiente a este ensayo, se muestran los diferentes gráficos de las medidas realizadas en Alumbres.

### **3.3.2. Estudio de la inyección de aire a presión en tuberías de impulsión en el Mar Menor**

En la segunda parte del ensayo se decidió realizar otra prueba a mayor escala, esta se ubicó en la zona del Mar Menor. Al igual que en el caso anterior, para la inyección de aire a presión en tuberías de impulsión fue necesario realizar una actuación en las estaciones de bombeo elegidas para el ensayo, siendo estas las que mayores valores presentan en cuanto a la concentración de sulfuros disueltos se refiere y que además confluyen en una última estación de bombeo de agua residual, desde la cual se envía el agua a la EDAR "Mar Menor Sur". Las 4 estaciones de bombeo donde se ha realizado el ensayo se encuentran situadas en Mar de Cristal, Playa Honda y Playa Paraíso, en dichas estaciones se han instalado unos compresores atendiendo a las

necesidades de caudal de aire a inyectar, capaces de suministrar hasta un 20% respecto del caudal de agua residual bombeada, se estimó que una equivalencia del 10% sería suficiente para enriquecer el agua en oxígeno y a su vez oxidar los sulfuros disueltos. Se realizaron medidas de oxígeno y sulfuros disueltos en el agua así como de ácido sulfhídrico en el aire, llevándose a cabo en las arquetas de rotura de cada impulsión estudiada.

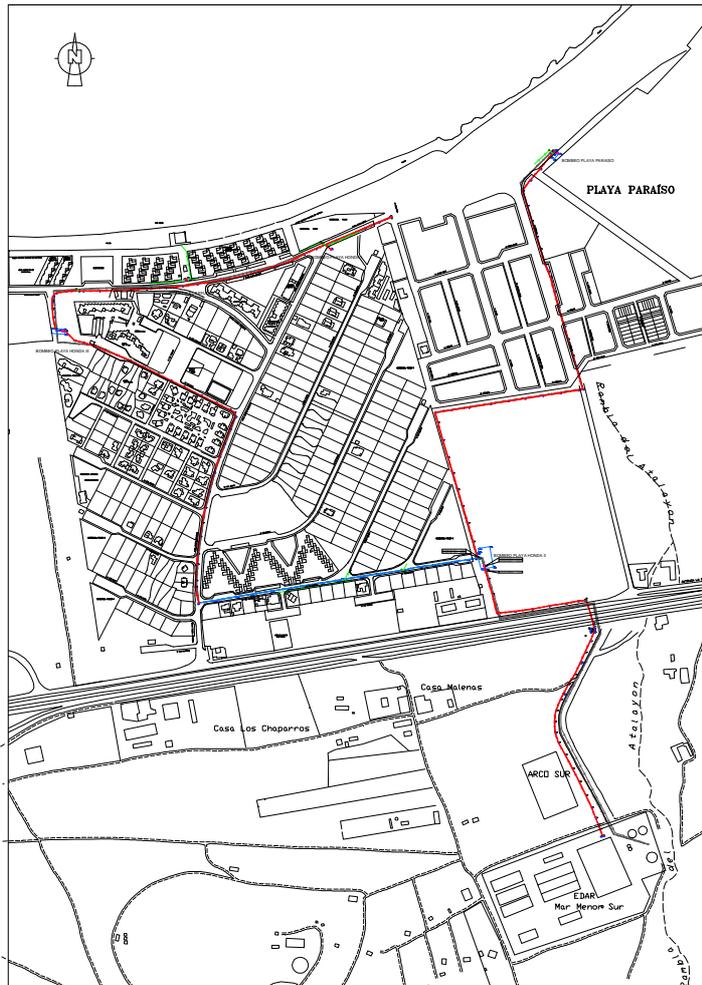


Figura 3.34 Plano de la zona del Mar Menor donde se ha llevado a cabo la actuación.

Para dar una idea de las instalaciones que se han llevado a cabo en la realización del ensayo, se muestran a continuación unas imágenes capturadas de los equipos compresores instalados en las estaciones de bombeo y varios puntos de muestreo.



Figura 3.35 Equipo compresor



Figura 3.36 Equipo compresor



Figura 3.37 Control de presión en la línea



Figura 3.38 Punto de medición



Figura 3.39 Muestreo del oxígeno disuelto



Figura 3.40 Arqueta de rotura



Figura 3.41 Muestreo del oxígeno disuelto



Figura 3.42 Muestreo del oxígeno disuelto

Las figuras expuestas dan idea de la variabilidad entre los puntos de muestreo, encontrando que para la medida de oxígeno disuelto existen puntos en los que la

impulsión se encuentra siempre en carga, mientras que en otros solamente se puede medir cuando existe un flujo de agua.

Las estaciones de bombeo se caracterizan por tener una distancia y una altura que superar diferente en cada caso, así como un caudal de agua y una frecuencia de bombeo, por este motivo se deben realizar los ajustes necesarios en cada equipo compresor hasta conseguir los resultados deseados. Para dar a conocer estas características se muestra la tabla 3.31 donde se incluyen los datos más relevantes de los puntos de actuación como son la distancia y altura que tiene que superar el agua y el diámetro de las tuberías de impulsión.

Punto de actuación	Distancia (m)	Altura (m)	Diámetro de la tubería (m)
Mar de Cristal	1600	15	350
Playa Honda IA	660	10	900
Playa Honda IB	660	10	550
Playa Honda II	672	23	350
Playa Paraíso	1043	12	350

Tabla 3.31 Características de las impulsiones de agua residual.

A continuación se presenta una descripción esquemática del proceso de inyección donde se muestra el modelo que siguen los puntos estudiados.

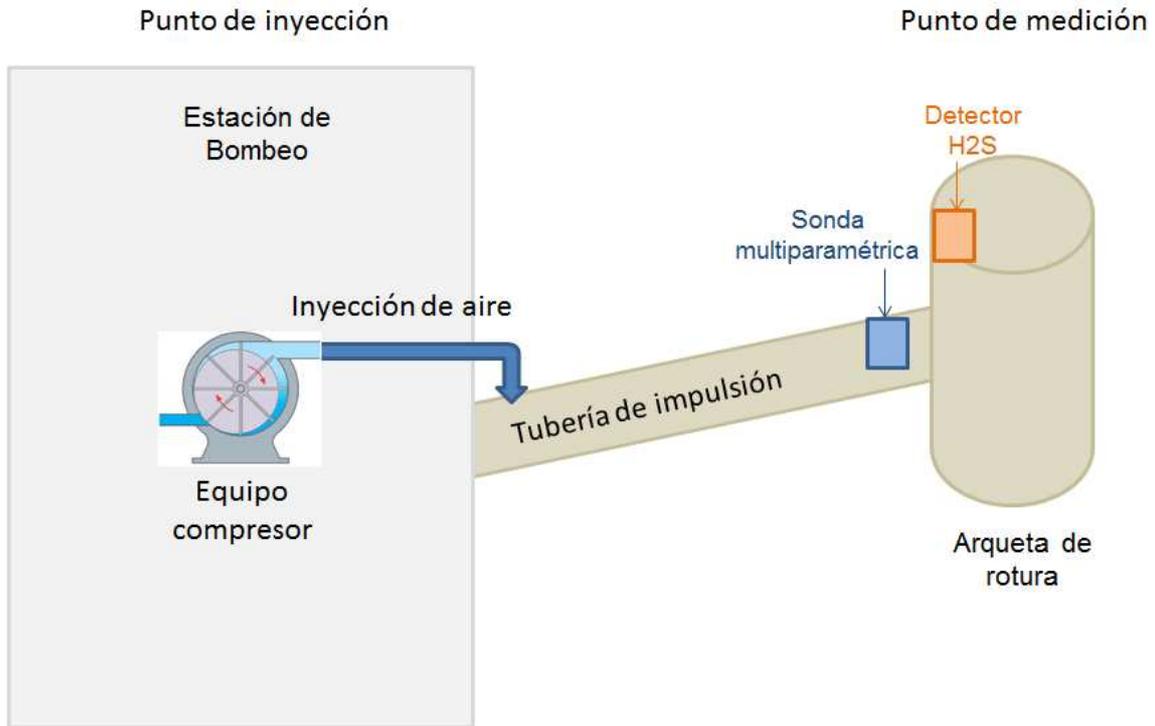


Figura 3.43 Esquema que se lleva a cabo con cada actuación.

Para la inyección de aire se utilizaron 5 compresores, correspondiendo 1 a cada impulsión estudiada, de estos 4 eran de tornillo y 1 de pistón. A continuación se muestra una tabla con las características más relevantes de estos equipos.

Punto de actuación	Modelo	Potencia consumida (kW/h)	Caudal de aire máximo a inyectar (m <sup>3</sup> /h)	Caudal de agua bombeado (m <sup>3</sup> /h)	Volumen de agua en la tubería (m <sup>3</sup> )
Mar de Cristal	R 5,5 IU 10-200	5,5	54,7	547	154
Playa Honda IA	UP 5-11-10	11	103,5	1035	420
Playa Honda IB	UP 5-7-10	7,5	56,6	566	105
Playa Honda II	UNIAIR 2	1,5	2,2	22	64
Playa Paraíso	R 2,2 IU 10-200	2,2	16,7	167	100

Tabla 3.32 Características de los equipos compresores.

La elección de cada compresor se hizo en función de los caudales de aire requeridos, en el caso de Playa Honda II se instaló un equipo compresor de pistón debido a los bajos caudales de aire demandados, este equipo al igual que los demás inyecta el aire sobre la clave de la tubería de impulsión que conduce el agua al punto de muestreo.

Se han realizado dos tipos de medidas, las primeras corresponden a mediciones tomadas en continuo en un punto de muestreo durante unas horas, para las que se necesitaban usar los equipos de medida de oxígeno disuelto y ácido sulfhídrico con almacenamiento de datos en la memoria de sendos equipos de manera que pudiesen ser recogidas al finalizar las mismas. Las segundas medidas que se muestran son de tipo puntual y en ellas se presenta el contenido de sulfuros y oxígeno disuelto, para poder tener un control diario de lo acontecido en todas las instalaciones.

Las medidas de ácido sulfhídrico se realizaron en las arquetas de rotura con el equipo de medición de gases, hay que destacar que las arquetas de rotura donde se realizaron las mediciones confluían con el colector principal que dirigía el agua residual hacia el último bombeo desde el cual se impulsaba el agua hasta la depuradora, esto era así en todos los puntos de muestreo a excepción de las medidas realizadas en la depuradora que corresponden a las impulsiones citadas de Playa Honda IA y Playa Honda IB. Además se tomaron muestras puntuales de agua para medir los sulfuros disueltos.

Las medidas de oxígeno disuelto se realizaron directamente en la tubería justo antes de la arqueta de rotura, para ello se tuvieron que hacer una serie de picajes a los que se les acopló una pieza en T, a esta se soldó después una tubería de polietileno por la se introducía la sonda multiparamétrica que realizaba las medidas.

En el caso de los puntos de muestreo correspondientes a los bombeos de Playa Honda, la tubería se encontraba siempre en carga, mientras que en los puntos de medición procedentes de los bombeos de Mar de Cristal y Playa Paraíso, la sonda se encontraba en contacto con el agua, únicamente cuando esta era bombeada desde la estación correspondiente en cada caso.

A continuación se muestran las medidas más representativas de cada uno de los puntos de muestreo. Para ello se han representado de manera conjunta los valores obtenidos de ácido sulfhídrico y oxígeno disuelto en una situación inicial, previa a la inyección de aire en las tuberías y en otra posterior, mientras se inyectaba aire de manera continua en dichas tuberías.

Las medidas que se han seleccionado, corresponden a la lectura que han realizado los equipos de medición durante 1 hora, aunque se realizasen medidas durante varias horas seguidas, lo que se pretende es simplificar la interpretación de los resultados, el resto de las medidas que se han tomado se encuentran en el anexo III correspondiente a este ensayo.

En el caso de la actuación en Playa Honda I, se tienen dos impulsiones de agua residual que la conducen hasta la depuradora de Mar Menor Sur donde se encuentran los dos puntos de muestreo correspondientes para cada impulsión, entre estas dos tuberías existe una diferencia de diámetro, siendo una casi el doble de la otra, parámetro ya presentado en la tabla 3.31. Cabe que destacar que a este bombeo llegan las líneas ya tratadas con aire comprimido de Mar de Cristal, Playa Honda II y Playa Paraíso, pero además también se transportan hasta aquí aguas procedentes de otros bombeos que no han sido tratados con aire comprimido. Las medidas realizadas en el punto de muestreo se llevan a cabo en un bypass realizado justo antes de la entrada de agua en el sistema de pretratamiento en la depuradora. Los gráficos correspondientes a cada una de las impulsiones se muestran a continuación.

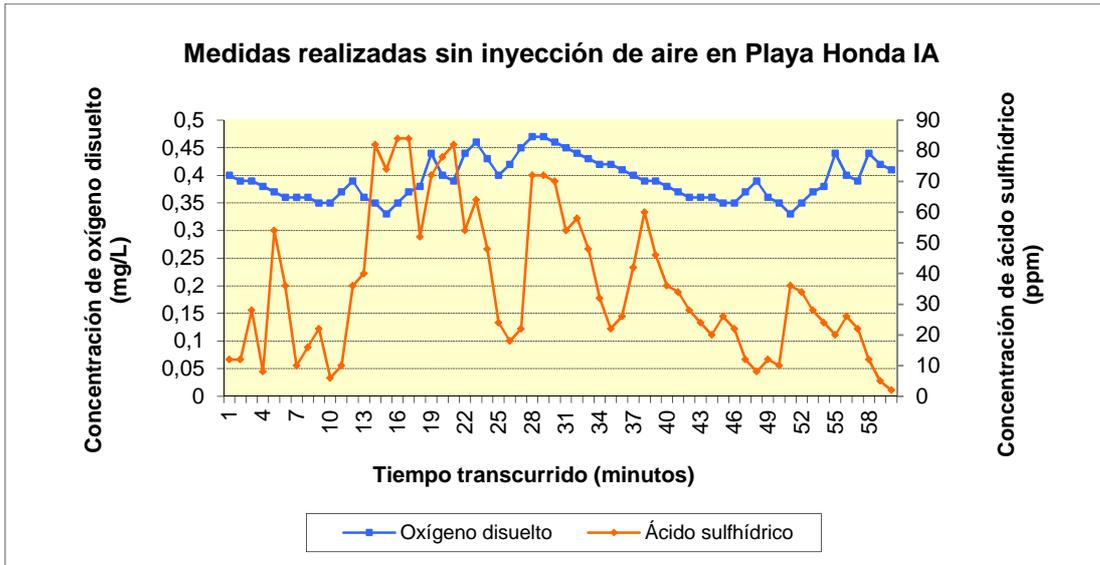


Figura 3.44 Concentración de oxígeno disuelto y ácido sulfhídrico sin inyección de aire en Playa Honda IA.

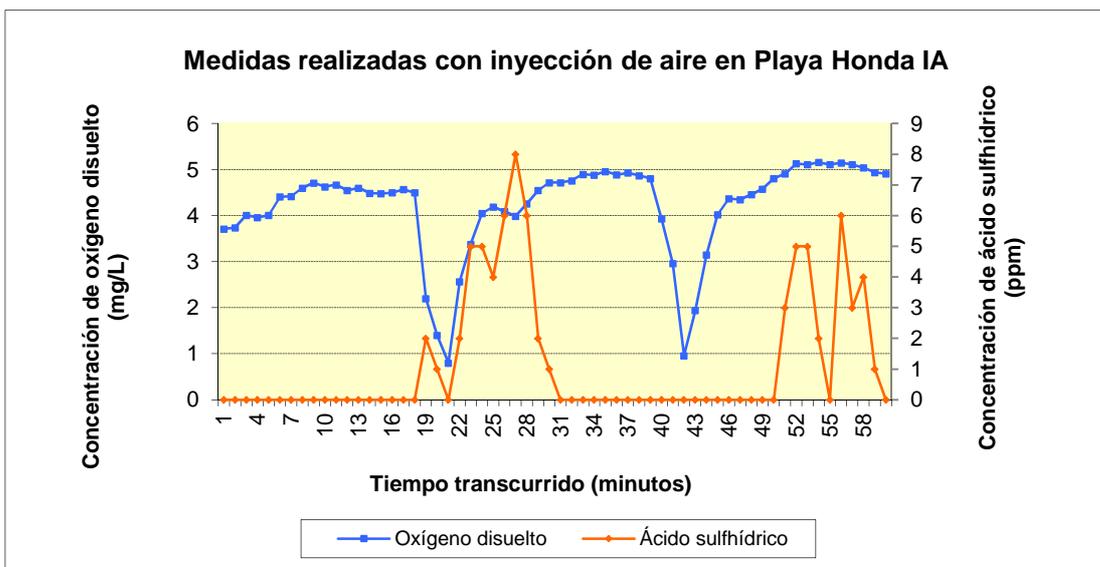


Figura 3.45 Concentración de oxígeno disuelto y ácido sulfhídrico con inyección de aire en Playa Honda IA.

Las medidas obtenidas cuando se inyecta aire muestran como el ácido sulfhídrico se anula prácticamente y los niveles de oxígeno disuelto se elevan a 4 mg/L frente a los 0,4 mg/L que se registran cuando no se realiza la inyección.

Las medidas de ácido sulfhídrico que se registran en el punto de muestreo cuando no se realiza la inyección, tienen unos valores moderados si los comparamos con los de

otros puntos de muestreo, esto se debe a que se realizan en una tubería en T que se acopló al bypass.

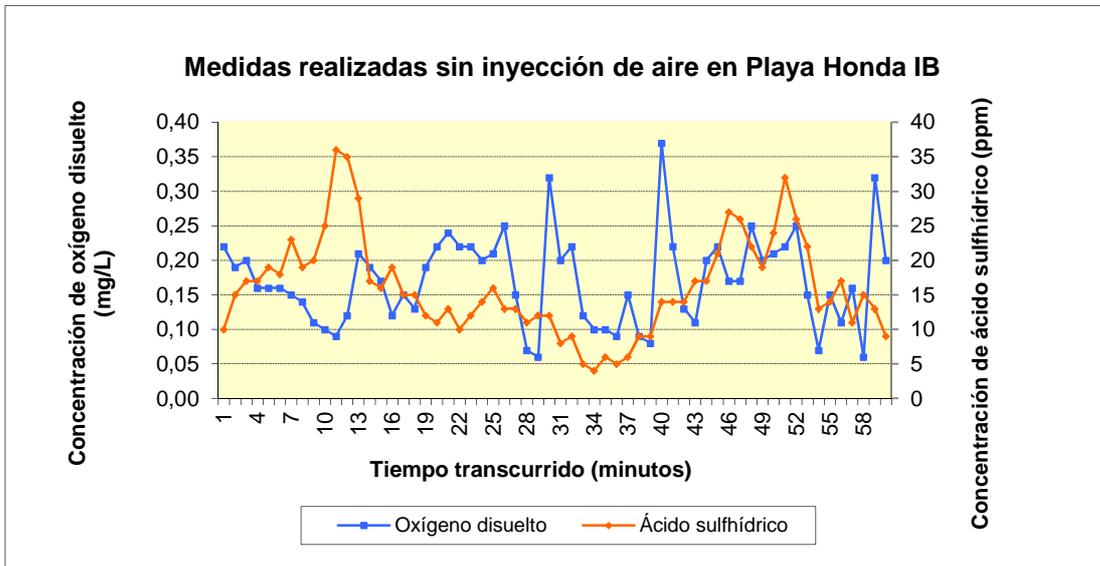


Figura 3.46 Concentración de oxígeno disuelto y ácido sulfhídrico sin inyección de aire en Playa Honda IB.

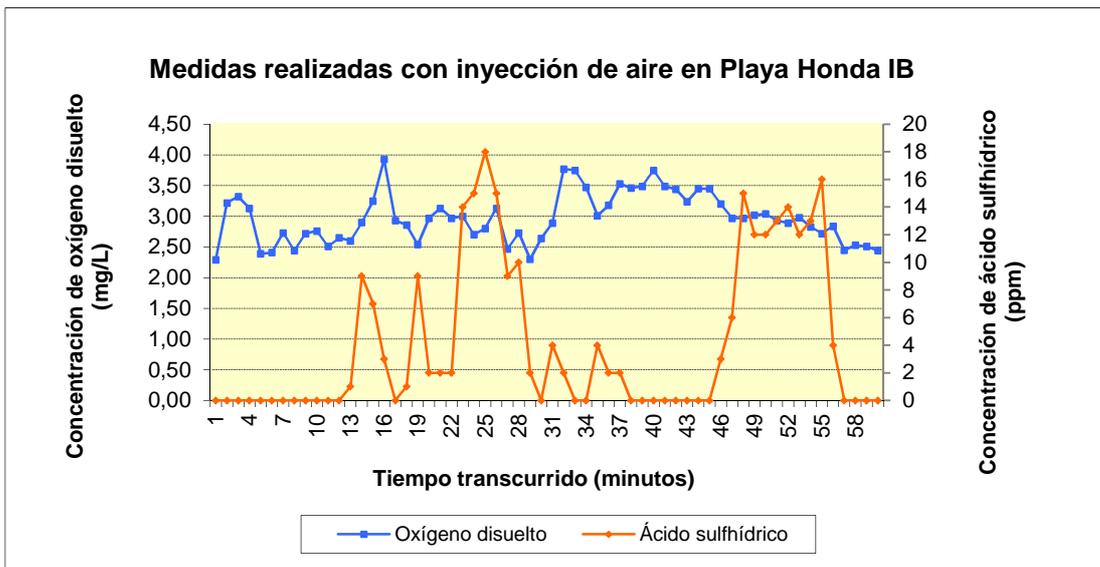


Figura 3.47 Concentración de oxígeno disuelto y ácido sulfhídrico con inyección de aire en Playa Honda IB.

Las medidas correspondientes a este punto de muestreo presentan un comportamiento similar al de Playa Honda IA, no obstante son algo inferiores a las registradas allí debido a una mayor frecuencia de bombeo. Se puede observar como

se alcanzan medidas de oxígeno disuelto sobre los 3 mg/L cuando se aplica el aire comprimido, acompañado de un descenso en el contenido de ácido sulfhídrico.

En el muestreo de Playa Honda II, hay que señalar que la instalación en este bombeo de un compresor de tipo pistón obligaba a que se programase la aplicación de aire de manera interrumpida, para la recuperación del equipo.

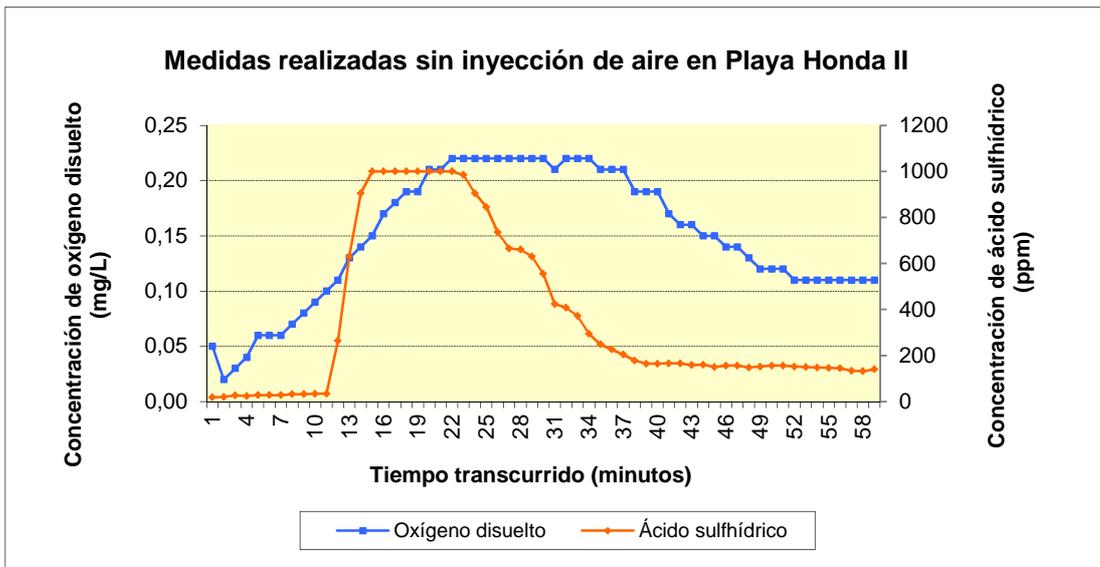


Figura 3.48 Concentración de oxígeno disuelto y ácido sulfhídrico sin inyección de aire en Playa Honda II.

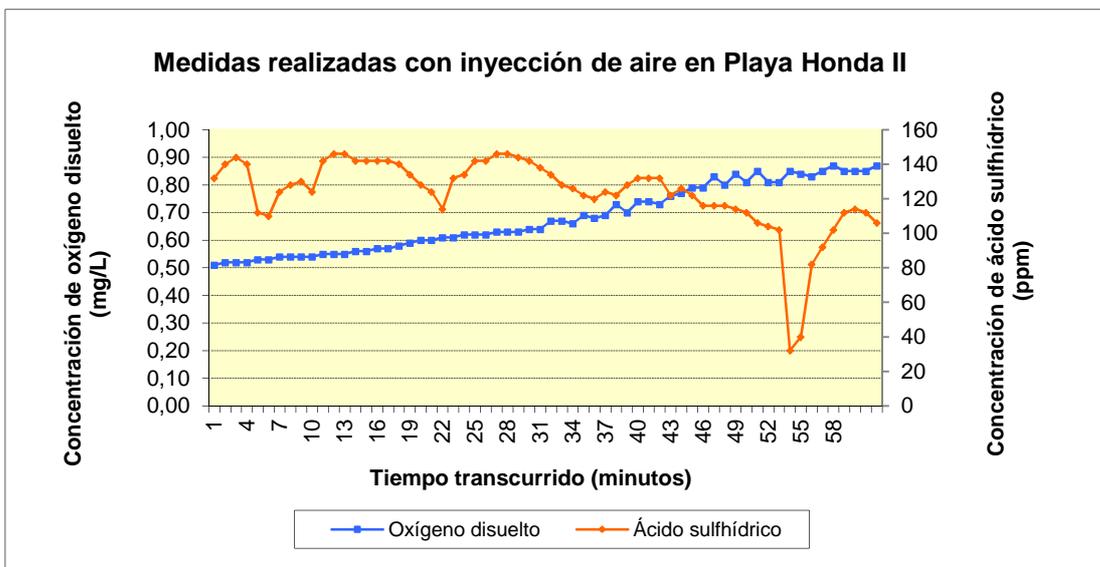


Figura 3.49 Concentración de oxígeno disuelto y ácido sulfhídrico con inyección de aire en Playa Honda II.

Las medidas realizadas muestran una sutil diferencia en cuanto al contenido en oxígeno disuelto se refiere para ambas situaciones, observándose que cuando se inyectaba aire comprimido se llega hasta valores de 1mg/l. Respecto a los niveles de ácido sulfhídrico se aprecia como se reducen estos con la inyección de aire comprimido.

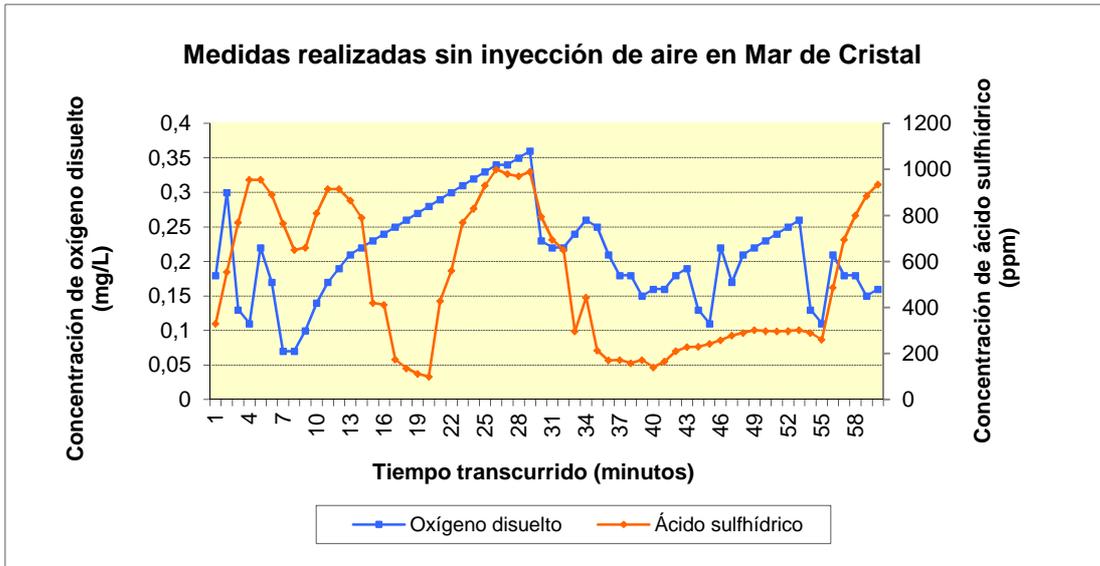


Figura 3.50 Concentración de oxígeno disuelto y ácido sulfhídrico sin inyección de aire en Mar de Cristal.

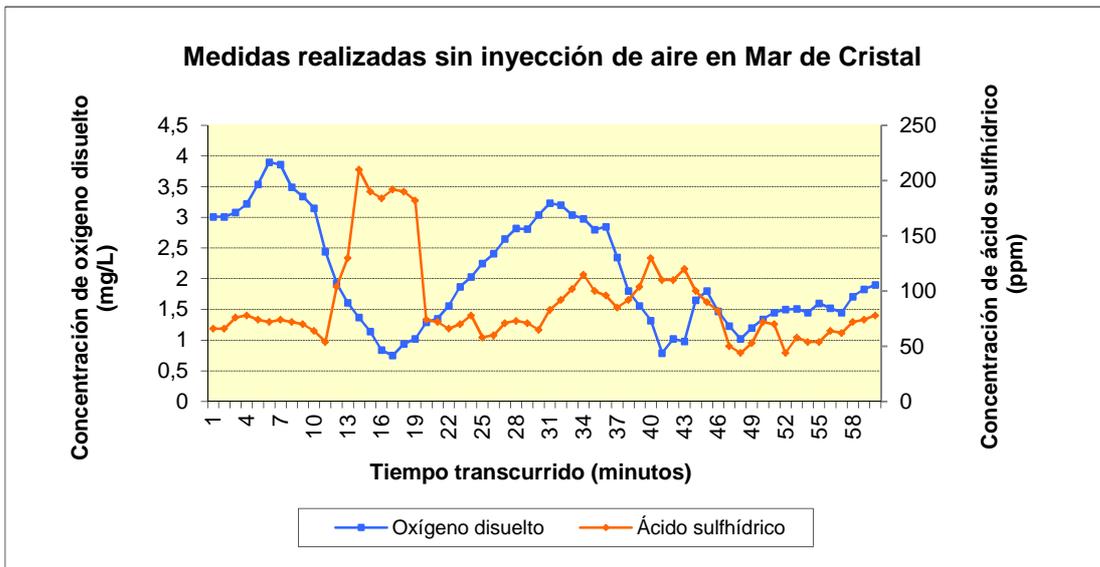


Figura 3.51 Concentración de oxígeno disuelto y ácido sulfhídrico con inyección de aire en Mar de Cristal.

Las medidas observadas indican un aumento del contenido en oxígeno disuelto cuando se realiza la inyección de aire, encontrando valores en torno a 2 mg/L, mientras que sin la inyección de aire estos niveles se encuentran sobre los 0,2 mg/L. Respecto a la medida de ácido sulfhídrico se encuentra una gran diferencia entre los valores máximos alcanzados que pueden llegar hasta 1000 ppm y el descenso que se da bajando a valores alrededor de 100 ppm al realizar la inyección de aire.

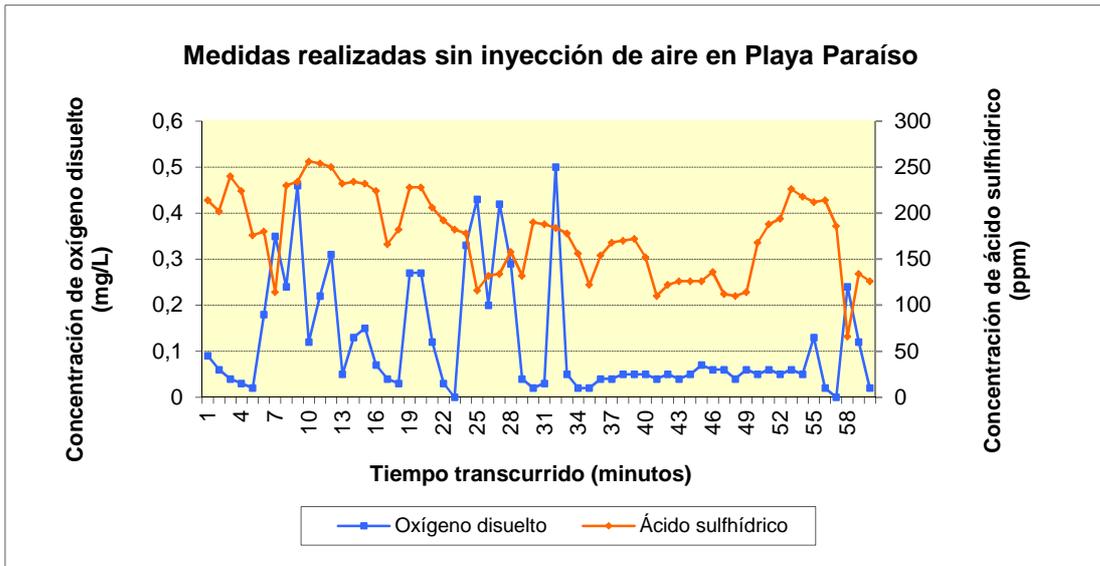


Figura 3.52 Concentración de oxígeno disuelto y ácido sulfhídrico sin inyección de aire en Playa Paraíso

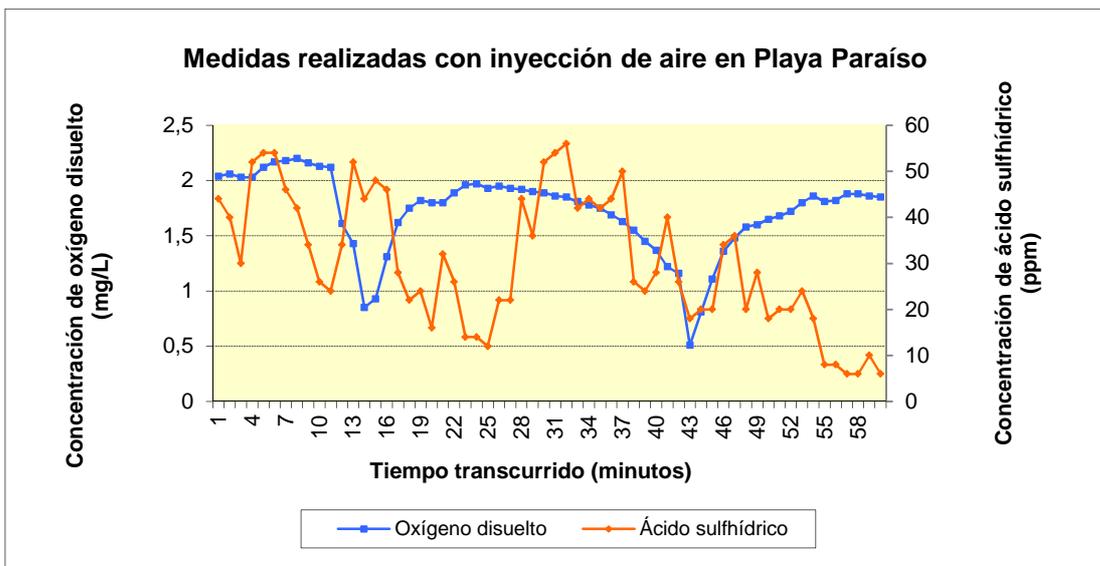


Figura 3.53 Concentración de oxígeno disuelto y ácido sulfhídrico con inyección de aire en Playa Paraíso

En este caso la inyección de aire vuelve a marcar una gran diferencia en los parámetros estudiados, obteniendo concentraciones de oxígeno disuelto de 2 mg/L y de 40 ppm de ácido sulfhídrico cuando se inyecta el aire, en comparación con los 200 ppm que se registran cuando no se inyecta aire comprimido junto a valores prácticamente nulos de oxígeno disuelto.

Como se ha mostrado en los diferentes gráficos, el comportamiento en los puntos de muestreo es similar en cuanto a la medida de ácido sulfhídrico se refiere, se observa un gran descenso en la concentración de este gas cuando se aplica la inyección de aire, recordar que respecto a este parámetro hay que tener en cuenta que las medidas tomadas coincidían con el flujo de otras líneas que no habían sido tratadas y por ello, aunque se hayan conseguido unos niveles altos de oxígeno disuelto en las aguas tratadas con inyección de aire, en la medida de este gas interfieren otras aguas no tratadas.

La concentración de oxígeno disuelto en los diferentes puntos de muestreo también muestra un comportamiento similar, encontrando en la mayoría de los casos una concentración de oxígeno disuelto, suficiente para que no se siga produciendo ácido sulfhídrico y para la oxidación de los sulfuros. Resulta evidente que en algunos puntos de muestreo se han registrado concentraciones de oxígeno disuelto en torno a 4 mg/l frente a valores obtenidos de 1 mg/L, lo que indica que hay que hacer un ajuste en el caudal de aire inyectado.

Las medidas realizadas junto con las características de la inyección de aire comprimido propias de cada instalación dieron la información necesaria para conocer la tasa del oxígeno inyectado frente al oxígeno consumido para la superficie de sección de cada colector de impulsión, expresada en kg/h m<sup>2</sup>.

Punto de actuación	Playa Honda IA	Playa Honda IB	Playa Honda II	Mar de Cristal	Playa Paraíso
Masa de oxígeno inyectada al agua (kg/h)	18,6	13,4	2,3	10	4
Masa de oxígeno consumida (kg/h)	6,3	1,6	1	2,4	1,5

Tabla 3.33 Masa de oxígeno en 1 hora para las condiciones de funcionamiento de las estaciones de bombeo.

Con los resultados presentados en la tabla 3.33 se puede establecer la tasa del oxígeno inyectado frente al oxígeno consumido para la superficie de sección de cada colector de impulsión, expresada en kg/h m<sup>2</sup>.

Punto de actuación	Playa Honda IA	Playa Honda IB	Playa Honda II	Mar de Cristal	Playa Paraíso
Ratio (oxígeno inyectado/oxígeno consumido) (kg/h m <sup>2</sup> )	1,9	1,3	0,2	0,4	0,2

Tabla 3.34 Ratio (oxígeno inyectado / oxígeno consumido) (kg/h m<sup>2</sup>)

De los resultados presentados en la tabla 3.34 se puede extraer que si bien en todos los casos se ha inyectado mayor cantidad de oxígeno que el requerido por la tasa de consumo de 0,15 mg/L, calculado anteriormente, también hay que tener en cuenta que se producirán una serie de reacciones químicas de oxidación que se suman al consumo de oxígeno disuelto. Por último destacar que tasa que relaciona el oxígeno inyectado con el oxígeno consumido por superficie muestra como en Playa Honda IA y Playa Honda IB este valor es mucho mayor que en el resto de las impulsiones y por esta razón las medidas realizadas en los puntos de muestreo un contenido en oxígeno disuelto de 4 mg/L, por tanto para conseguir esta concentración en el resto de

impulsiones será necesario aumentar el caudal de aire inyectado hasta conseguir un ratio aproximado de 1,5 kg/h m<sup>2</sup>.

Las medidas puntuales sirvieron para comprobar la eficacia del tratamiento de inyección de aire comprimido para cada uno de los puntos de medición, así se determinó el contenido de oxígeno y sulfuros disueltos en el agua residual. Además se aportan otros datos de interés como son los caudales de aire inyectado y de agua bombeada. Previamente a la inyección de aire se realizaron las medidas de oxígeno y sulfuros disueltos que se encontraban en los valores que figuran en cada tabla según el punto de muestreo estudiado.

A continuación de muestran las medidas puntuales registradas para Playa Honda IA

Medidas previas a la inyección de aire en Playa honda IA (mg/L)

Oxígeno disuelto

Sulfuros disueltos

0,1

20

Tabla 3.34 Concentraciones de oxígeno y sulfuros disueltos sin inyección de aire en Playa Honda IA.

Pruebas en Playa Honda IA	Presiones (bar)		Caudales (m <sup>3</sup> /h)			Medidas con inyección de aire (mg/L)	
	Línea de impulsión	Inyección de aire	Agua residual (m <sup>3</sup> /h)	Aire (m <sup>3</sup> /h)	% (aire/agua residual)	Oxígeno disuelto	Sulfuros disueltos
A	2,6	3	1035	75	7,2	4,3	0
B	2,6	3	1035	74,5	7,2	3,85	0
C	2,6	3	0	74,5	-	6,85	0
D	2,6	3	0	77	-	6,6	0
E	2,6	3	0	77	-	7,05	0
F	2,6	3	0	74,5	9,6	7	0
G	2,6	3	1035	75	9,5	4,8	0
H	2,6	3	1035	76	9,5	4,5	0

Tabla 3.35 Presiones y caudales de agua y aire y concentraciones de oxígeno y sulfuros disueltos con inyección de aire en Playa Honda IA.

En la tabla se puede apreciar el alto contenido en oxígeno disuelto alcanzado, encontrando valores que son excepcionalmente altos que corresponden a medidas realizadas en la impulsión cuando no había bombeo de agua, hay que recordar que este punto de medición se encontraba siempre en carga y que por tanto cuando no se bombeaba agua por la impulsión, esta acumulaba oxígeno hasta que se volvía a bombear. Queda claro que con estos niveles de oxígeno no se generan más sulfuros ni se libera por tanto ácido sulfhídrico.

Medidas previas a la inyección de aire en Playa Honda IB (mg/L)

Oxígeno disuelto	Sulfuros disueltos
0,1	20

Tabla 3.36 Concentraciones de oxígeno y sulfuros disueltos previas sin inyección de aire en Playa Honda IB.

Pruebas en Playa Honda IB	Presiones (bar)		Caudales (m <sup>3</sup> /h)			Medidas con inyección de aire (mg/L)	
	Línea de impulsión	Inyección de aire	Agua residual (m <sup>3</sup> /h)	Aire (m <sup>3</sup> /h)	% (aire/agua residual)	Oxígeno disuelto	Sulfuros disueltos
A	2,6	3	566	54	9,9	3,4	0
B	2,6	3	566	54,5	9,6	2,35	0
C	2,6	3	566	54,5	9,6	2,4	0
D	2,2	2,7	0	54	-	5,5	0
E	2,6	3	0	53	-	5,15	0
F	2,6	3	566	54,2	9,6	3,65	0
G	2,6	3	566	54	9,6	3,35	0
H	2,4	2,6	566	54	9,9	3,5	0

Tabla 3.37 Presiones y caudales de agua y aire y concentraciones de oxígeno y sulfuros disueltos con inyección de aire en Playa Honda IB.

Al igual que ocurría en el caso anterior los niveles de oxígeno disuelto que se registraron fueron mas que satisfactorios

Medidas previas a la inyección de aire en Playa Honda II (mg/L)

Oxígeno disuelto	Sulfuros disueltos
0,1	20

Tabla 3.38 Concentraciones de oxígeno y sulfuros disueltos sin inyección de aire en Playa Honda II.

Pruebas en Playa Honda II	Presiones (bar)		Caudales (m <sup>3</sup> /h)			Medidas con inyección de aire (mg/L)	
	Línea de impulsión	Inyección de aire	Agua residual (m <sup>3</sup> /h)	Aire (m <sup>3</sup> /h)	% (aire/agua residual)	Oxígeno disuelto	Sulfuros disueltos
A	1	2,5	22	9,5	43,2	0,3	20
B	1	2	22	9,5	43,2	0,4	8
C	1	2	22	9,5	43,2	0,4	8
D	1	2	22	9	40,9	0,3	10
E	1	2	22	9,2	41,8	0,4	5
F	0,9	2	22	9,3	42,3	0,7	0
G	1	2	22	9,5	43,2	1,7	0
H	1	2	22	9,2	41,8	1,65	0

Tabla 3.39 Presiones y caudales de agua y aire y concentraciones de oxígeno y sulfuros disueltos con inyección de aire en Playa Honda II.

En este caso los resultados indican unos niveles de oxígeno disuelto bajo, coincidiendo con un contenido en sulfuros disueltos relativamente alto que derivará en la liberación de ácido sulfhídrico, además resulta incongruente este comportamiento cuando aplicamos un caudal de aire que es poco menos de la mitad que el de agua, lo que debería suponer un aumento en el contenido en oxígeno, no obstante hay que recordar que el funcionamiento de este compresor no es continuo.

Medidas previas a la inyección de aire en Mar de Cristal (mg/L)

Oxígeno disuelto	Sulfuros disueltos
0,1	22

Tabla 3.40 Concentraciones de oxígeno y sulfuros disueltos sin inyección de aire en Mar de Cristal.

Pruebas en Mar de Cristal	Presiones (bar)		Caudales (m <sup>3</sup> /h)			Medidas con inyección de aire (mg/L)	
	Línea de impulsión	Inyección de aire	Agua residual (m <sup>3</sup> /h)	Aire (m <sup>3</sup> /h)	% (aire/agua residual)	Oxígeno disuelto	Sulfuros disueltos
A	2	2	547	39,6	7,2	0,7	0
B	2	2,2	547	41,7	7,6	1,5	0
C	2,2	2,2	547	41,5	7,6	1,8	0
D	2	2,1	547	40,5	7,4	3,05	0
E	2	2,4	547	40	7,3	1,5	0
F	2	2,4	547	40,7	7,4	2,3	0
G	2	2,4	547	40,3	7,4	1,5	0
H	2	2,4	547	40,7	7,4	2,3	0

Tabla 3.41 Presiones y caudales de agua y aire y concentraciones de oxígeno y sulfuros disueltos con inyección de aire en Mar de Cristal.

Los resultados obtenidos son positivos puesto que se han conseguido eliminar los sulfuros disueltos y con ello la posible generación de ácido sulfhídrico, además la concentración en oxígeno disuelto es adecuada para conservar unas condiciones aerobias.

Medidas previas a la inyección de aire en Playa Paraíso (mg/L)

Oxígeno disuelto	Sulfuros disueltos
0,1	24

Tabla 3.42 Concentraciones de oxígeno y sulfuros disueltos sin inyección de aire en Playa Paraíso.

Pruebas en Playa Paraíso	Presiones (bar)		Caudales (m <sup>3</sup> /h)			Medidas con inyección de aire (mg/L)	
	Línea de impulsión	Inyección de aire	Agua residual (m <sup>3</sup> /h)	Aire (m <sup>3</sup> /h)	% (aire/agua residual)	Oxígeno disuelto	Sulfuros disueltos
A	1,6	1	167	16,5	9,9	0,2	12
B	1,6	1,2	167	16	9,6	0,4	10
C	1,6	1,2	167	16	9,6	0,7	0
D	1,6	1	167	15,5	9,3	0,3	5
E	1,5	1	167	16,3	9,7	0,25	7
F	1,5	1	167	16	9,6	0,4	5
G	1,5	2,4	167	16	9,6	2,25	0
H	1,5	2,4	167	16,5	9,9	2,75	0

Tabla 3.43 Presiones y caudales de agua y aire y concentraciones de oxígeno y sulfuros disueltos con inyección de aire en Playa Paraíso.

En este caso las medidas de oxígeno disuelto fueron normalmente bajas por lo que el contenido en sulfuros disueltos fue alto hasta que se consiguió aumentar la presión de inyección de aire, que al superar el valor de presión que tenía la línea dio como resultado una concentración de oxígeno disuelto superior a 2 mg/L y por consiguiente una eliminación de los sulfuros.

Con los resultados obtenidos se puede concluir que en puntos donde la eliminación de los sulfuros ha sido completa y el contenido en oxígeno disuelto es superior a 1 mg/L, se ha conseguido un resultado exitoso, consiguiendo llevar el agua residual a unas condiciones aerobias en las que no se generan sulfuros ni se libera ácido sulfhídrico, únicamente ha habido un punto de muestreo en el que en repetidas ocasiones se ha

medido una lectura positiva de sulfuros y baja concentración de oxígeno disuelto, sin haber conseguido dar una solución a este problema salvo el cambio del equipo compresor por otro de mayor potencia.

Otra conclusión que se puede extraer es que es necesaria una presión superior a la de la línea de impulsión para garantizar unos niveles de oxígeno disueltos aceptables.

De esta manera queda demostrada la eficacia de los sistemas de inyección de aire para la eliminación de sulfuros y prevención de olores, utilizando este método de un bombeo a otro se asegura la oxidación de los sulfuros, evitando que se genere ácido sulfhídrico y acabando así con los problemas de olores.

## CONCLUSIONES

---

- Del ensayo de inyección de aire se puede concluir que aplicando a las submuestras un caudal de aire de 2,25 L/min durante una duración de 10 minutos se consigue la oxigenación del agua residual, manteniendo unos niveles de oxígeno disuelto en torno a 1 mg/L transcurrida una hora desde el comienzo del tratamiento, además se consiguen eliminar los sulfuros disueltos en el agua residual liberados en forma de ácido sulfhídrico a la atmósfera, los valores de este gas en algunos casos llegan a superar los 100 ppm mientras se les aplica el tratamiento de inyección de aire.

La aplicación de caudales de inyección de aire comprendidos entre 2,25 y 0,22 L/min puede conseguir la oxigenación de las submuestras, alcanzando valores de oxígeno disuelto en torno a los 5 mg/l tras una duración de 10 minutos de inyección de aire, lo que equivale a una tasa de aire inyectado de 0,44 L/min por cada litro de aguas residual, manteniendo las muestras unas concentraciones como mínimo de 1 mg/L transcurrida media hora tras la aplicación del tratamiento.

Los niveles de ácido sulfhídrico alcanzados indican que con un caudal de 0,22 L/min de inyección de aire se libera el gas de una manera más paulatina y que por tanto hace más asequible el posterior tratamiento del ácido sulfhídrico en la atmósfera, además la medida de los sulfatos muestra como se ha producido una eliminación de los compuestos reducidos de azufre en forma de ácido sulfhídrico con los mayores caudales de aire. Aun así este tratamiento tiene la complicación de que donde se libera el aire provocamos problemas de malos olores. Por otro lado las medidas de la  $DBO_5$  demuestran la eficacia de la inyección de aire como pretratamiento del agua residual.

- Los resultados obtenidos en cuanto a la ventilación de aire indican que si bien cuantas más renovaciones de aire se realizan por hora mayores son las posibilidades de una eliminación completa de los sulfuros disueltos, con un mínimo de 5 renovaciones a la hora, se pueden eliminar de las muestras hasta

10 mg/L de sulfuros disueltos, mientras que para concentraciones de 30 mg/L habrá que realizar al menos 20 renovaciones a la hora, por lo que resulta recomendable la aplicación de chimeneas de ventilación de aire a lo largo de todo el colector, si no donde se ventile olerá.

Las medidas de compuestos reducidos de azufre como sulfitos y tiosulfatos muestran un descenso al aplicar el tratamiento de ventilación de aire, siendo esta diferencia más clara para tasas comprendidas entre 20 y 26 renovaciones por hora. Respecto al balance de azufres no se ha podido cuadrar con las medidas de ácido sulfhídrico, sulfitos, tiosulfatos, sulfuros y sulfatos, lo que se puede deber a las interferencias en las medidas de estos compuestos, al error de los métodos de determinación de dichos compuestos y a una posible formación de azufre elemental.

- Los resultados del ensayo de inyección de aire a presión en tuberías de impulsión demuestran la eficacia de este método para la eliminación de los sulfuros disueltos en las aguas residuales, para conseguir que la concentración de oxígeno disuelto alcance los 4 mg/L, la tasa de oxígeno inyectado frente al consumido por la superficie de cada colector de impulsión tiene que ser de 1,5 kg/h m<sup>2</sup>, dicha concentración de oxígeno inhibe la generación de sulfuros, consiguiendo unas condiciones aerobias además de oxidar a los sulfuros disueltos que se encontraban inicialmente en el agua.
  
- Por todo lo que se acaba de exponer se puede concluir que tanto la ventilación de aire mediante chimeneas en colectores de gravedad, como la inyección de aire en tuberías de impulsión son métodos eficaces para la eliminación de sulfuros disueltos, estos métodos deberían ser usados en las actuales redes de saneamiento donde se producen problemas de olores para eliminarlos.

## BIBLIOGRAFÍA

---

- A Case Study: Prediction of Sulfide generation and Corrosion in Concrete Gravity Sewers. Prepared by J.B. Gilbert and Associates for the American Concrete Pipe Association, Whashington, DC, 1979.
- Boon, A.G. Septicity in Sewers: Causes, Consequences and containment. *Water Science and Technology*, 31 (7): 237-253, 1995.
- Burns, R.G. *The Chemistry and Micro-biology of Pollution*, 1975.
- Academic Press, Nueva York, EE.UU.
- Condon, R.L., R.A. Cooper, and A.J. Englande. *Instream Aeration to Control Dissolved Sulfides in Sanitary Sewers*. NTIS N° 223342, U.S. Environmental Protection Agency, Cincinati, OH, 1973.
- *Control of Odors and Corrosion in the Sacramento Regional Wastewater Conveyance System*. Sacramento Area Consultants, Septembers, 1976.
- Delgado, S.,M. Álvarez. *H<sub>2</sub>S Generation in a Reclaimed Urban Wastewater Pipe. Case Study: Tenerife (Spain)*. *Water Research*, 33(2), 539-547, 1999.
- *Design Manual, Odor and Corrosion Control in Sanitary Sewerage Systems and Treatment Plants*. US. EPA, 1985.
- *Design Manual: Sulfide and Corrosion Prediction and Control*. American Concrete Pipe Association, Vienna, VA, 1984.
- Dague, R.R. *Fundamentals of Odor Control*. *JWPCF* 44 (4): 583-594, 1972.
- Davy, W.J. *Influence of Velocity on Sulfide Generation in Sewers*. *Sewage and Industrial Wastes*. 22 (9): 1132-1137, 1950.
- *Drinking Water and Health*, National Academy of Sciences, Whashington, DC, 1977.
- Harkness, N. *Chemistry of Septicity*. *Effluent and Water Treatment Journal* 20 (1):16-23, 1980.
- Jocelyn, P.C. *Biochemistry of the SH group*. Academic Press, Nueva York, EE.UU.,1972.

- Kameda, Y., Morita, T. Two Phase Flow Study Using 300 mm Diameter Pipe. Japanese Journal of Multiphase Flow, 4 (3), 1990.
- Kameda, Y., Morita, T. Two Phase Flow Study Using 200 mm Diameter Pipe. Japanese Journal of Multiphase Flow, 7 (3), 1993.
- Laughlin, J.A. Studies in Force Main Aeration Journal ASCE-SED 90 (SA 6):13-24, 1964.
- Mullins, W.H., Aerators Control Lift Station Odor and Corrosion, Water and Sewage Works. 124(3):75, 1977.
- Metcalf and Eddy. Wastewater engineering, treatment, disposal, and reuse. McGraw Hill, 1995.
- Ochi, T.,M. Kitakawa. Controlling Sulfide Generation in Force Mains by Air Injection. Water Science and Technology, 37 (1): 87-95, 1998.
- Odor Control for Wastewater Facilities. Manual of Practice N° 22, Water Pollution Control Federation, Washington, DC, 1979.
- Parkhurst, J.D., and R.D. Pomeroy. Oxygen Absorption in Streams. Journal ASCE-SED 98 (SA1): 101-124, 1972.
- Piscarczyk, K. Odor Control with Potassium Permanganate. Presented at Ohio Water Pollution Control conference, Dayton, OH, June 16-18, 1982.
- Pomeroy, R., and F.D. Bowlus. Progress Report on Sulfide Control Research. Sewage Works Journal 18 (4): 597-640, 1946.
- Pomeroy R.D., and R.J. Lofy. Feasibility Study on In-Sewer Treatment Methods. NTIS N° PB-271445, U.S. Environmental Protection Agency, Cincinnati, OH, 1972.
- Pomeroy, R.D. sanitary Sewer Design for Hydrogen Sulfide Control. Public Works, 101 (10): 93, 1970.
- Pomeroy, R.D., J.D. Parkhurst, J. Livingston, and H.H. Bailey. Sulfide Occurrence and Control in Sewage Collection Systems. U.S. Environmental Protection Agency, EPA 600/x-85-052, Cincinnati, OH, 1985.
- Pomeroy, R.D., and J.D. Parkhurst. The Forecasting of Sulfide Buildup Rates in Sewers. Progress in Water Technology 9 (3): 621-628, 1977.

- Process Design Manual for Sulfide Control in Sanitary Sewerage Systems and Treatment Plants. US. EPA, 1974.
- Process Design Manual for Sulfide Control in Sanitary Sewerage Systems. NTIS N° pB-260479, U.S. Environmental Protection Agency, Center for Environmental Research Information, Cincinnati, OH, 1974.
- Rubin, A.J. Chemistry of Sulfur Species and Their Removal From Water Supply. Chemistry of Water Supply, Treatment and Distribution, Ann Arbor Science Publishers Inc., EE.UU., 109-135, 1974.
- Sawyer, C.N., and P.L. Mc Carty. Chemistry for Sanitary Engineers. McGraw-Hill, New York, NY, 1967.
- Schremmer, H. Estimation of biogenic sulfuric acid corrosion in Sewers. Sewerage, Waste Correspondence, 37, 1332 -1339, 1990
- Sewell, R.J. Sulfide Control in Sanitary Sewers Using Air and Oxygen. NTIS N° PB-243894, U.S. Environmental Protection Agency, Cincinnati, OH, 1975.
- Speece, R.E., U-Tube Aeration Sensitivity to Design Parameters. JWPCF 55(8): 1065, 1983.
- Takatoshi, O. and M.Kitagawa. Controlling Sulfide Generation in Force Mains by Air Injection. Water Science and Technology, 37 (1): 87-95, 1998.
- Tanaka, N. and K. Takenaka. Control of Hydrogen Sulfide and Degradation of Organic Matter by Air Injection a Wastewater Force Main. Water Science and Technology, 31 (7): 273-282, 1995.
- Thistlethwayte, D.K.B. (ed). The Control of Sulphides in Sewerage Systems. Ann Arbor Science, Ann Arbor, MI, 1972.
- Vivona, M.A. and G.W. Whalen. Controlling Sulfides and Odors in Sewers- Part 1. Public Works 113 (3): 73-76, 1982.
- Warren, G.D., and G. Tchobanoglous. A study of the Use of Concrete Pipe Trunk Sewers in the City of Delano, California. Prepared for the California Precast Concrete Pipe Associaton, September, 1976.

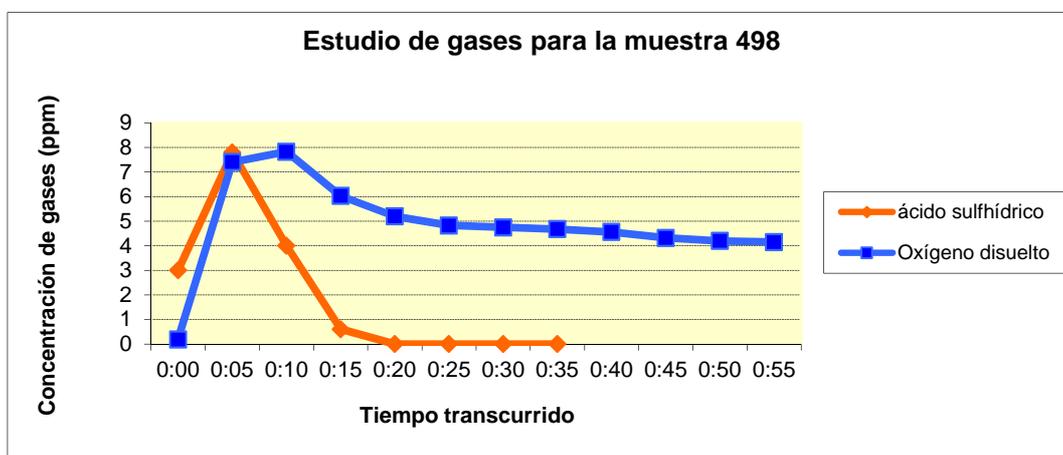
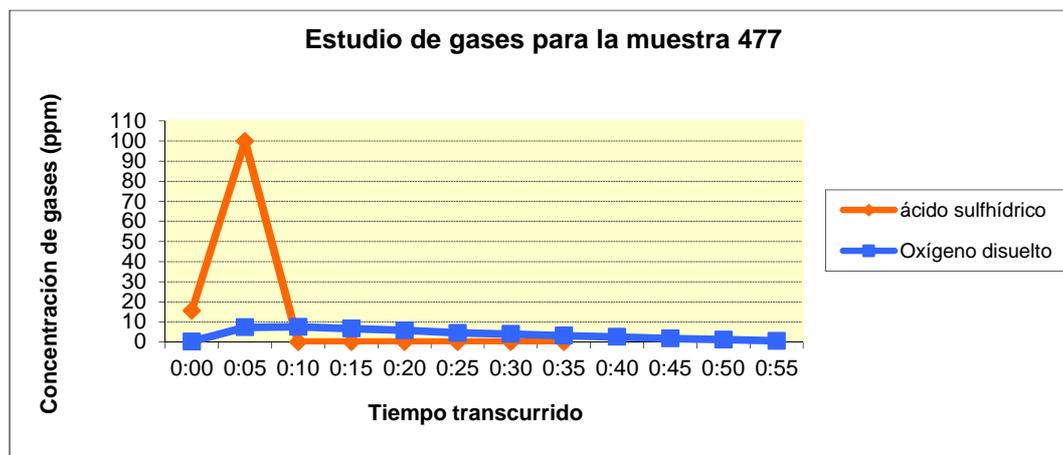
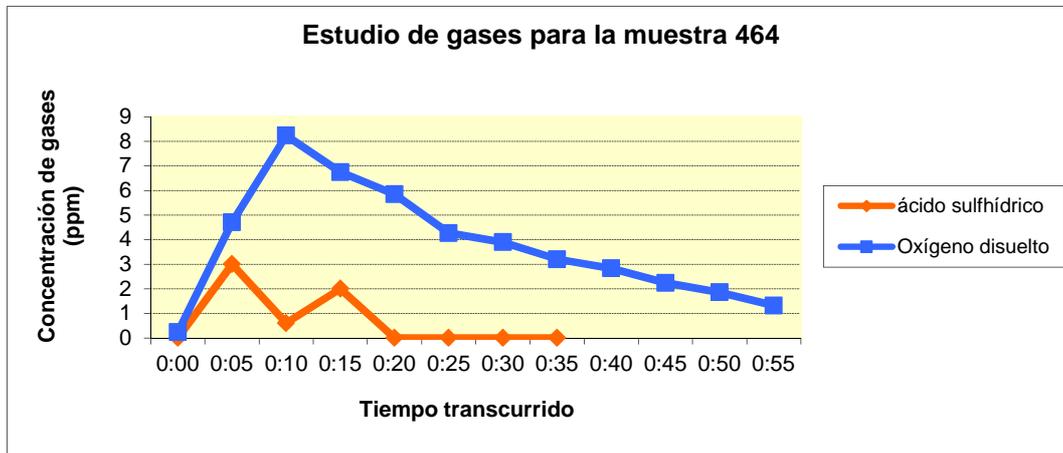
## ANEXO I

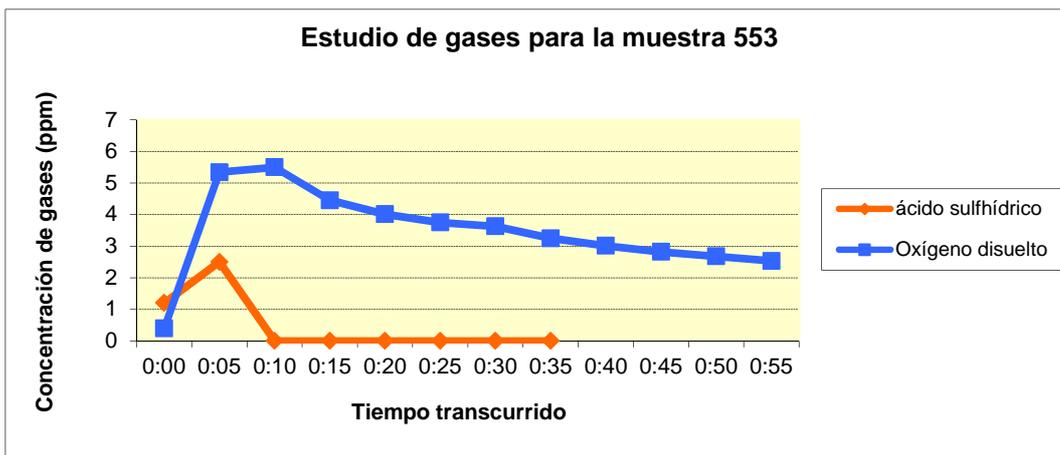
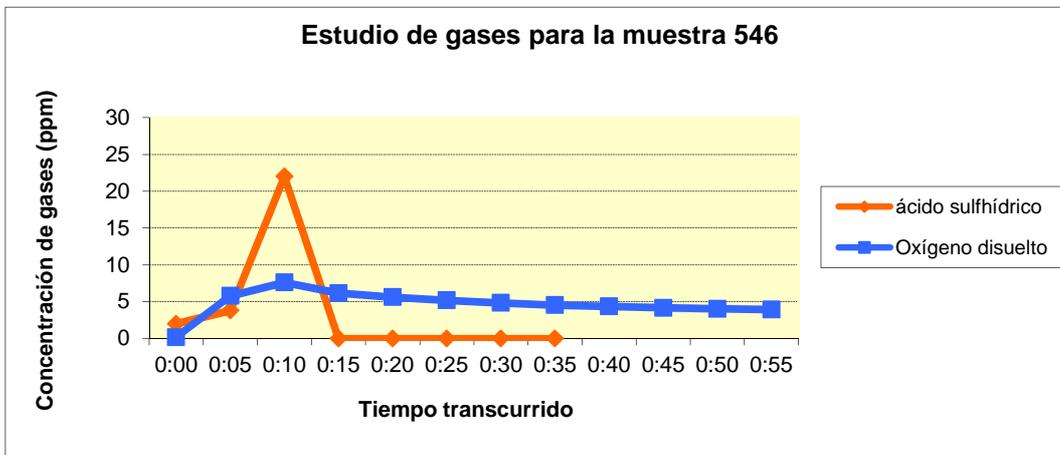
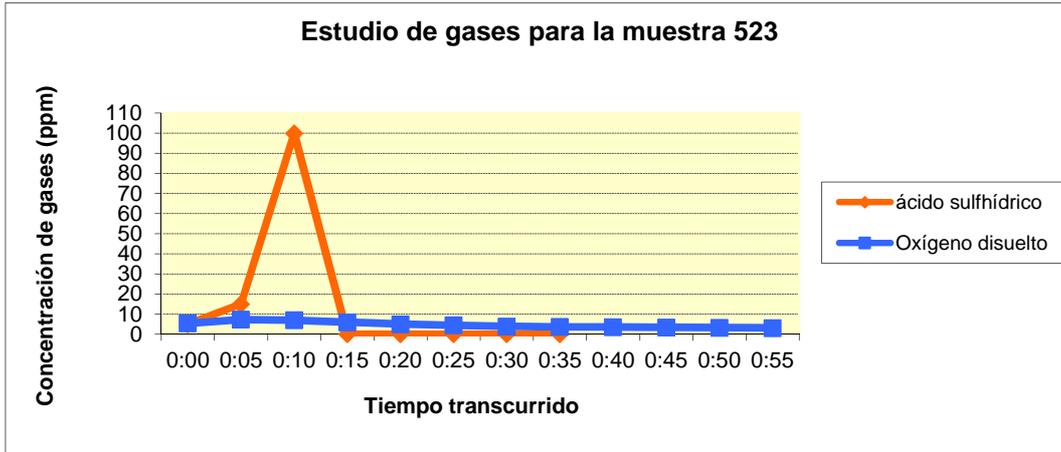
Este anexo corresponde a las medidas realizadas en el primer ensayo. A continuación se presentan los resultados obtenidos correspondientes a la caracterización de las muestras, en los que figuran los parámetros físico-químicos tales como  $DBO_5$ , DQO, Sulfatos, Sólidos en suspensión, Conductividad eléctrica y pH, estos se exponen en la tabla 8.1

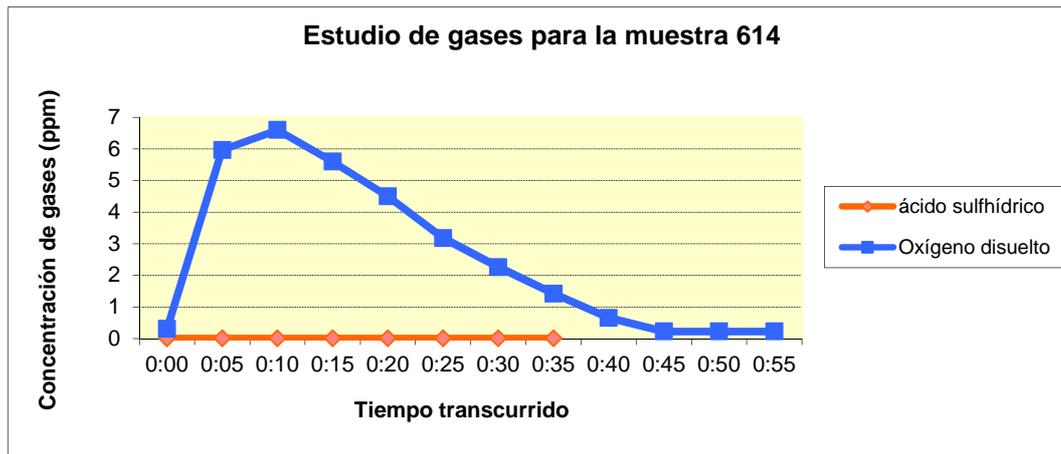
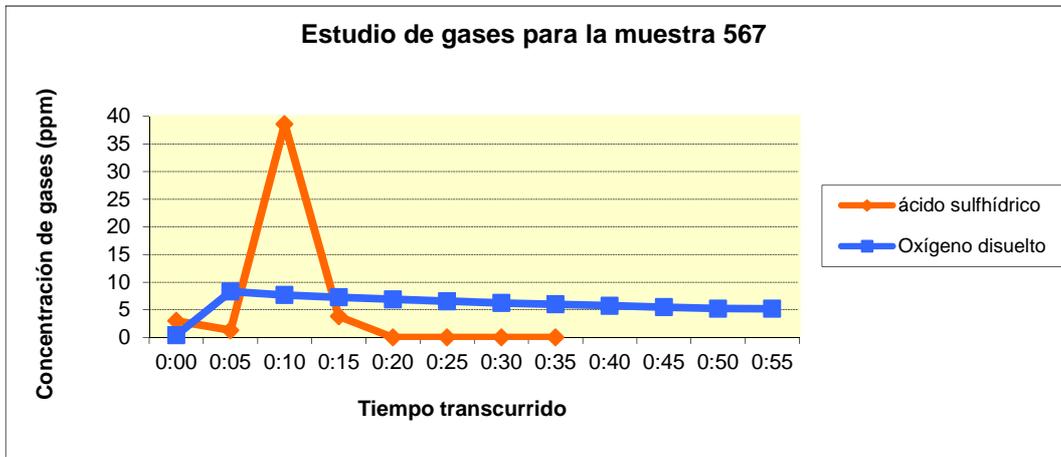
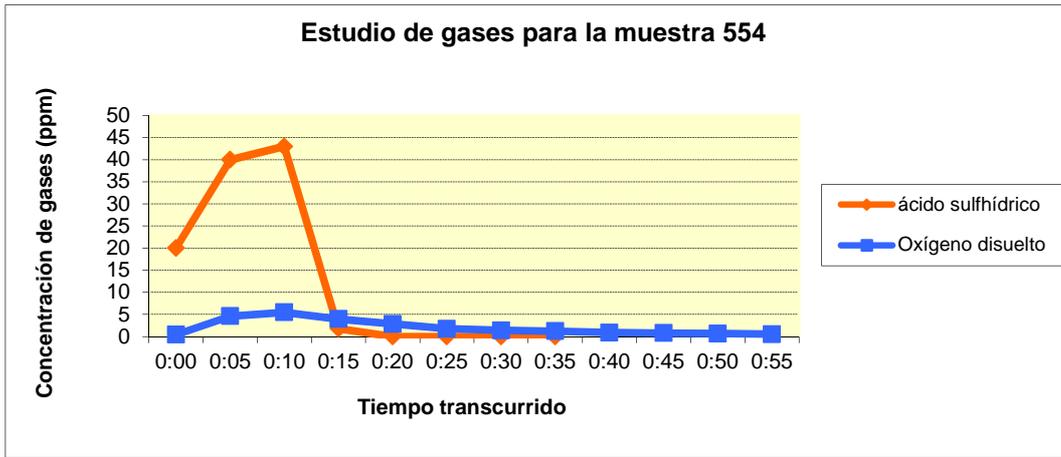
<b>Muestra</b>	<b>945</b>	<b>966</b>	<b>978</b>	<b>979</b>	<b>982</b>
<b><math>DBO_5</math></b>		500	700	300	820
<b>DQO</b>	630	1335	1650	724	583
<b>Sulfatos</b>	470	340	400	550	510
<b>S.Suspensión</b>	336	898	452	208	141
<b>C.E.</b>	3130	2680	2660	7030	5710
<b>pH</b>	7,73	7,25	7,39	7,8	7,83
<b>Muestra</b>	<b>983</b>	<b>995</b>	<b>1032</b>	<b>1049</b>	<b>1064</b>
<b><math>DBO_5</math></b>	190	300	350	250	400
<b>DQO</b>	630	600	690	571	732
<b>Sulfatos</b>	450	430	700	660	320
<b>S.Suspensión</b>	191	117	153	113	246
<b>C.E.</b>	5880	8890	7370	8650	4223
<b>pH</b>	7,52	7,83	8,07	7,55	7,46
<b>Muestra</b>	<b>1076</b>	<b>1087</b>	<b>1098</b>	<b>1109</b>	<b>1111</b>
<b><math>DBO_5</math></b>	480	580	460	920	1000
<b>DQO</b>	692	813	775	636	756
<b>Sulfatos</b>	300	780	480	480	840
<b>S.Suspensión</b>	130	116	278	302	138
<b>C.E.</b>	4040	9530	5360	5850	10170
<b>pH</b>	7,47	7,6	7,26	7,45	7,35
<b>Muestra</b>	<b>1129</b>	<b>1140</b>	<b>1141</b>		
<b><math>DBO_5</math></b>	300	420	360		
<b>DQO</b>	568	630	626		
<b>Sulfatos</b>	720	720	740		
<b>S.Suspensión</b>	91	133	139		
<b>C.E.</b>	8730	10350	14250		
<b>pH</b>	7,42	7,34	7,3		

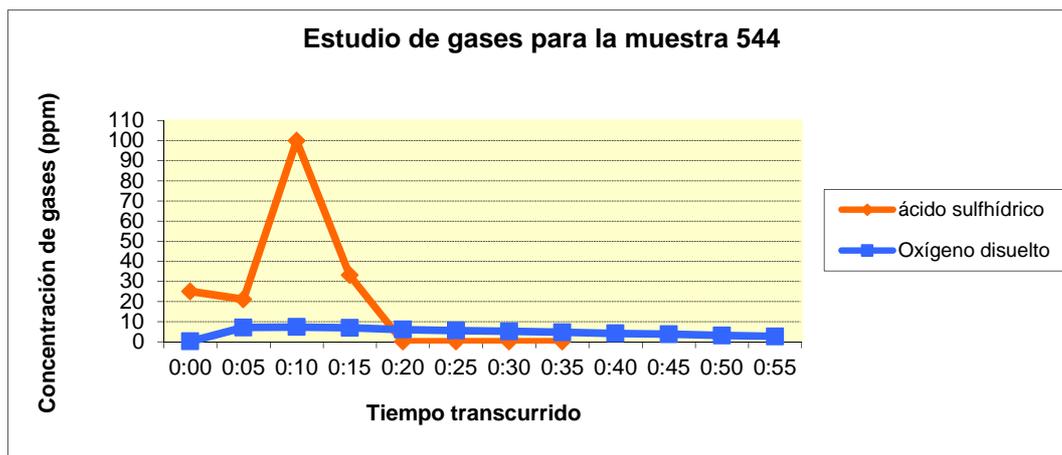
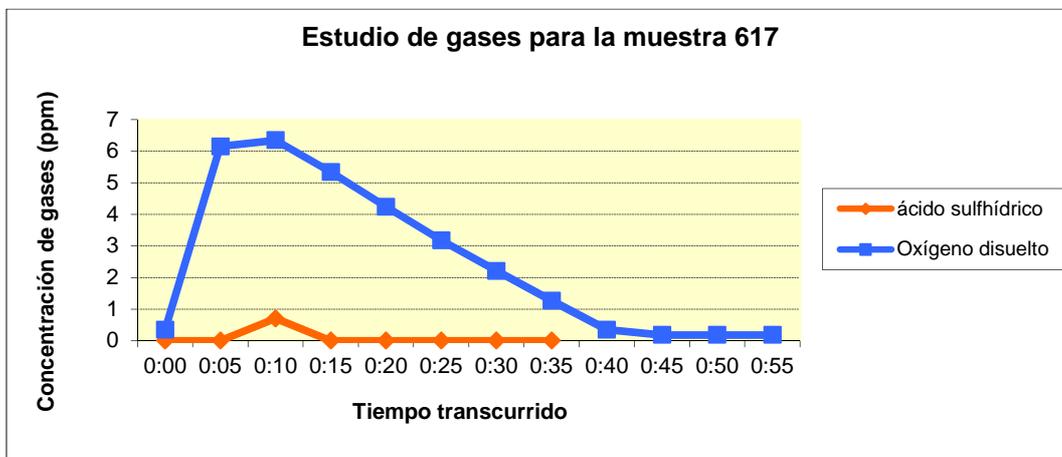
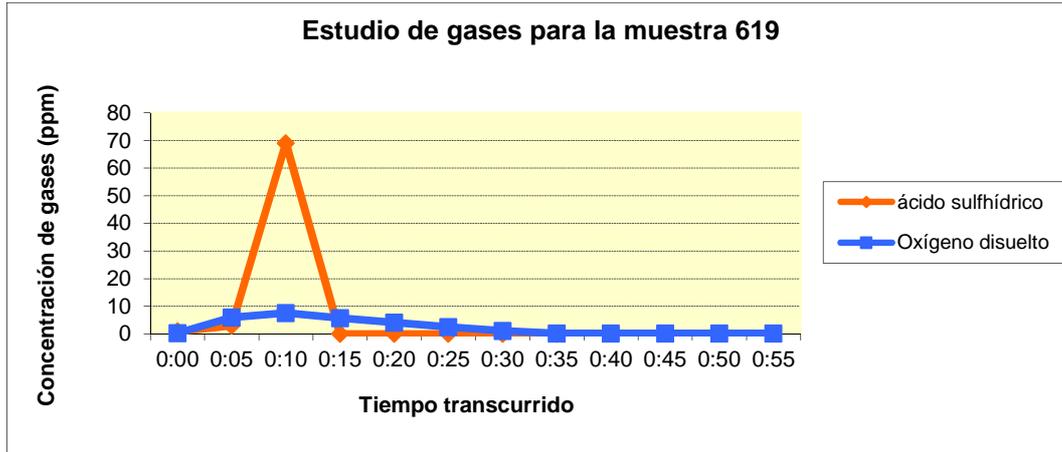
Tabla 8.1 Análisis físico-químico

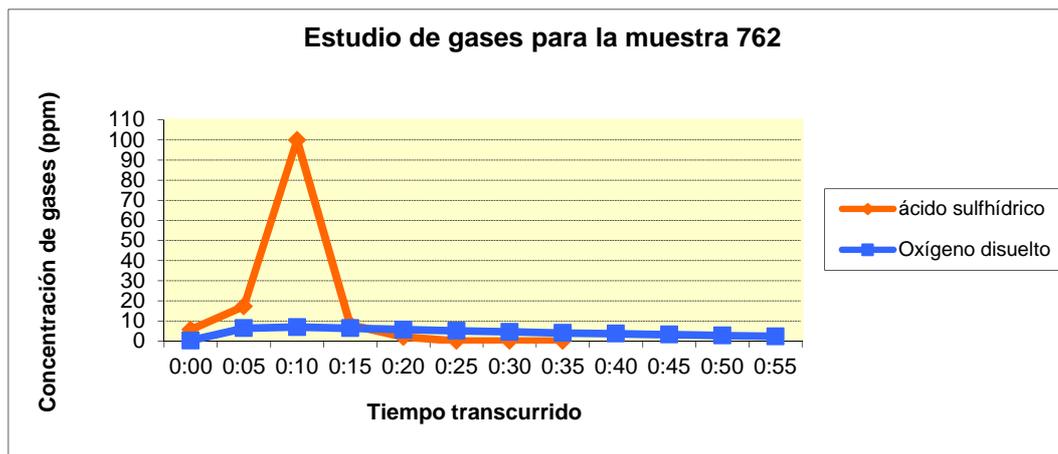
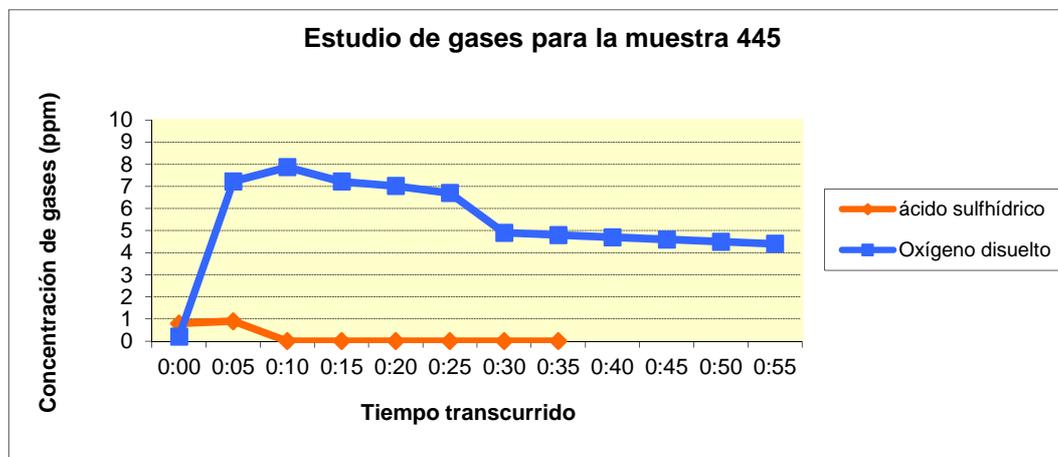
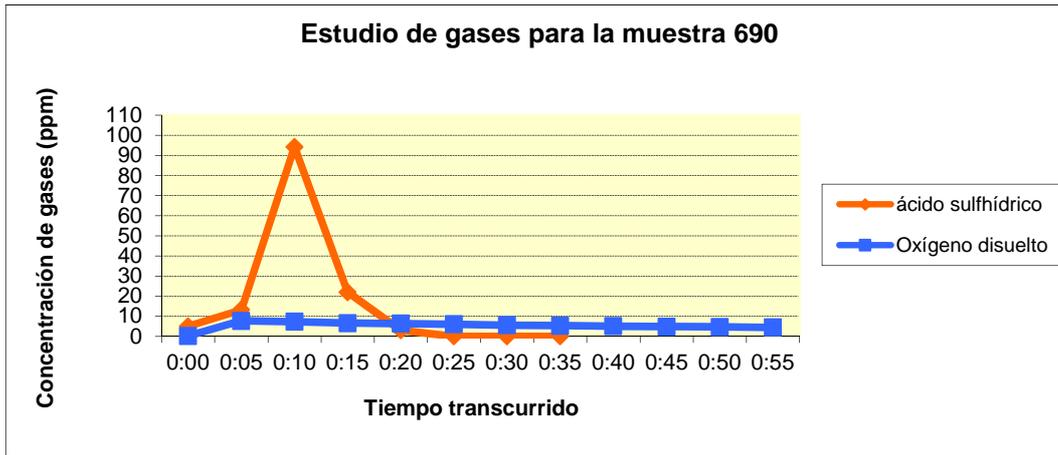
Las gráficas que se muestran a continuación presentan los resultados del primer ensayo correspondientes a las medidas de ácido sulfhídrico y de oxígeno disuelto para cada muestra al aplicárseles 10 minutos de inyección de aire con un caudal de 2,25 L/min.

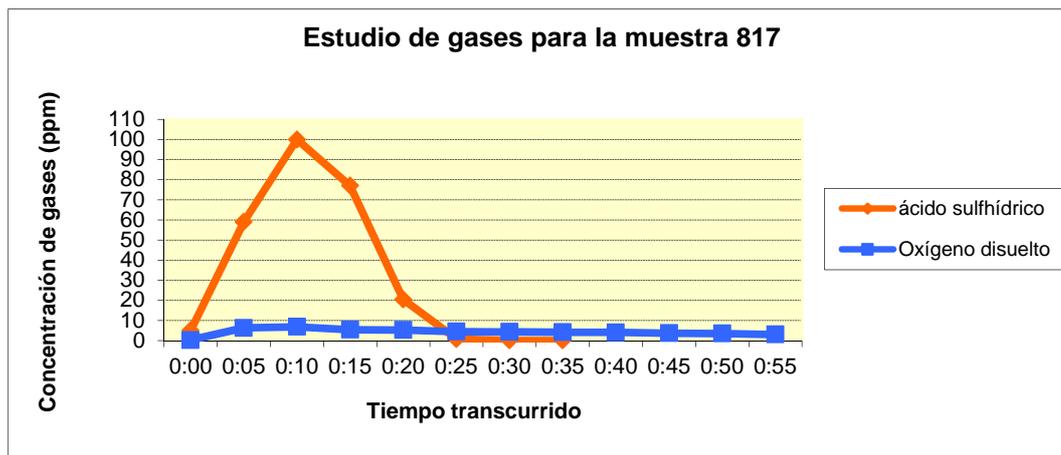
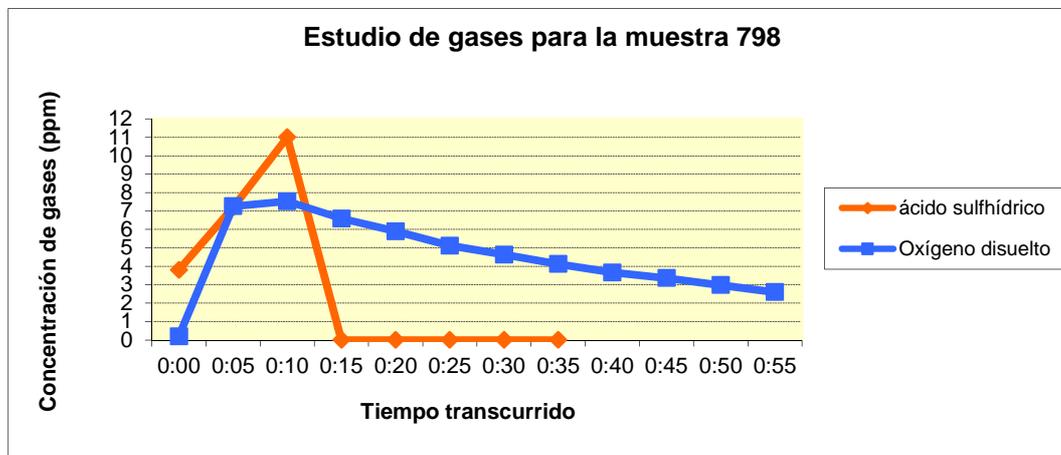
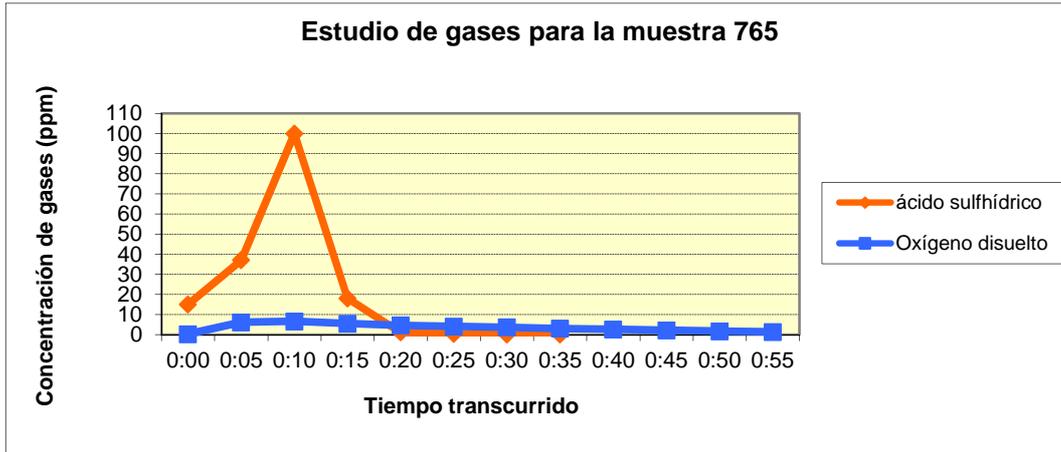


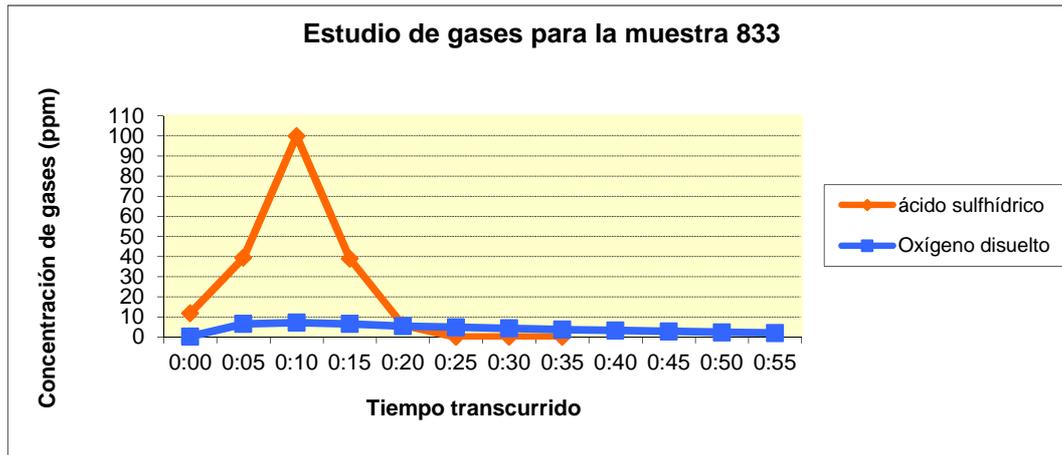






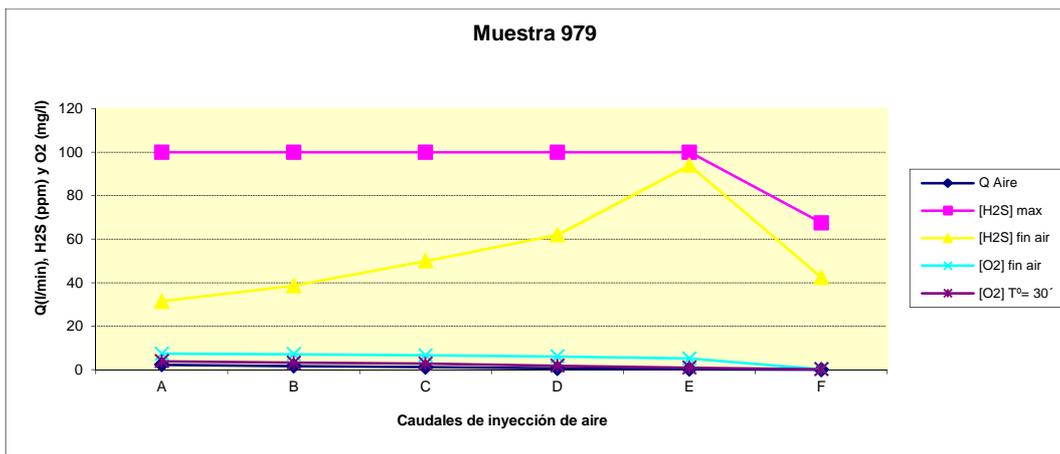


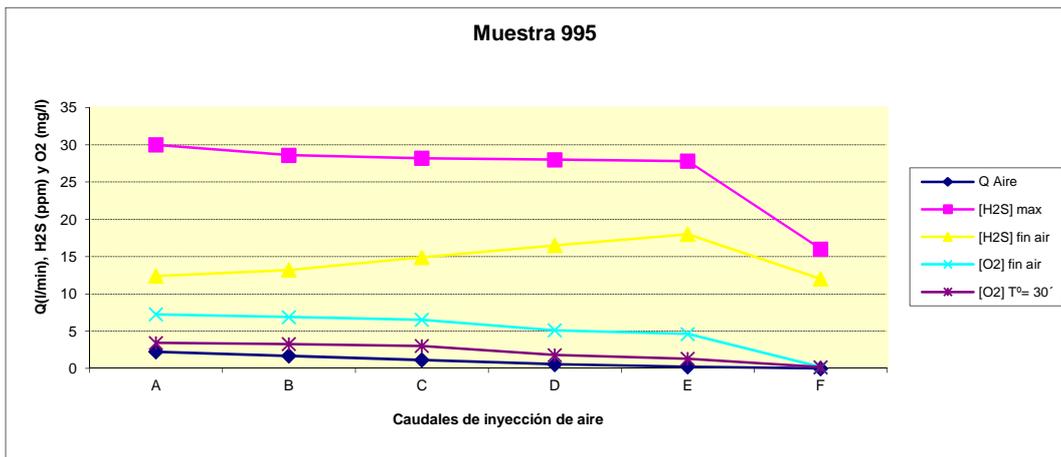
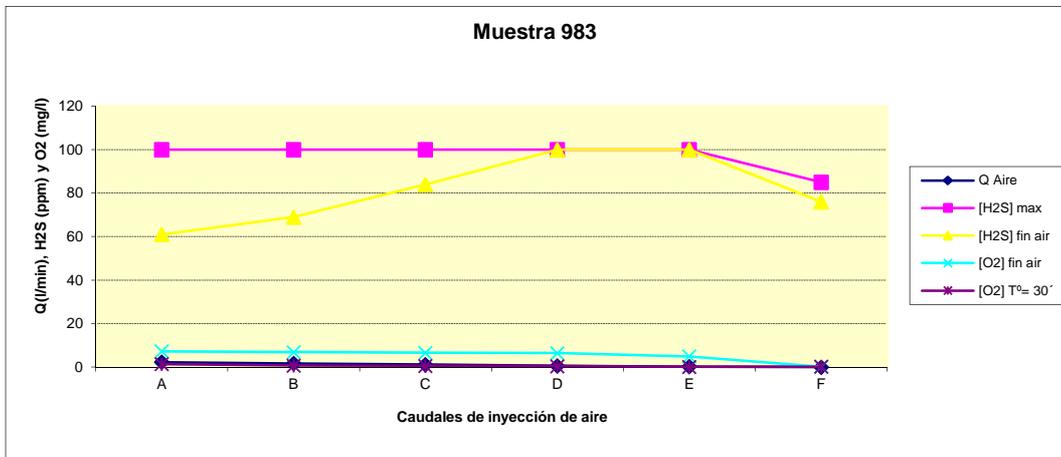
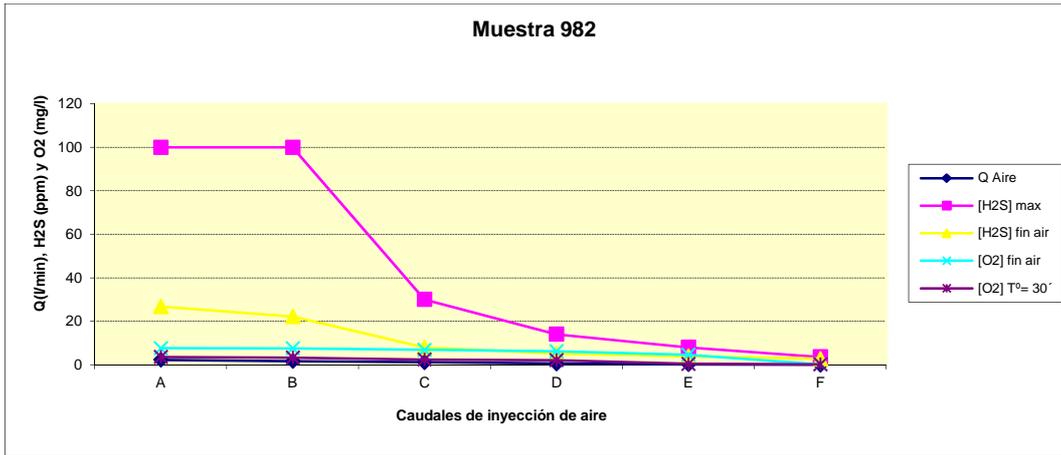


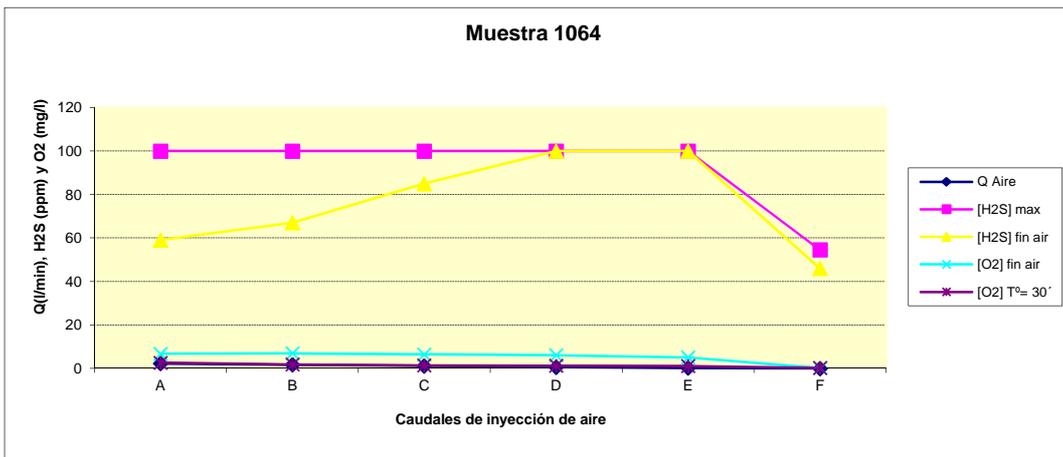
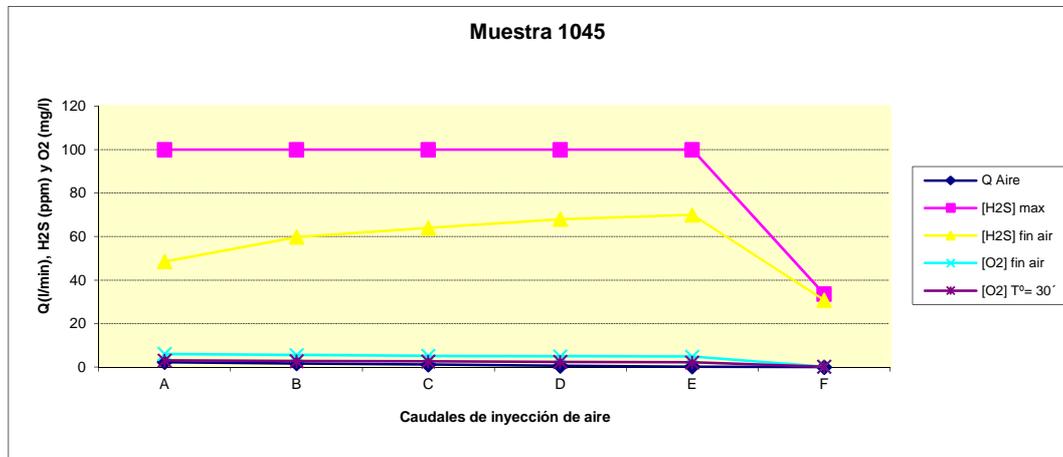
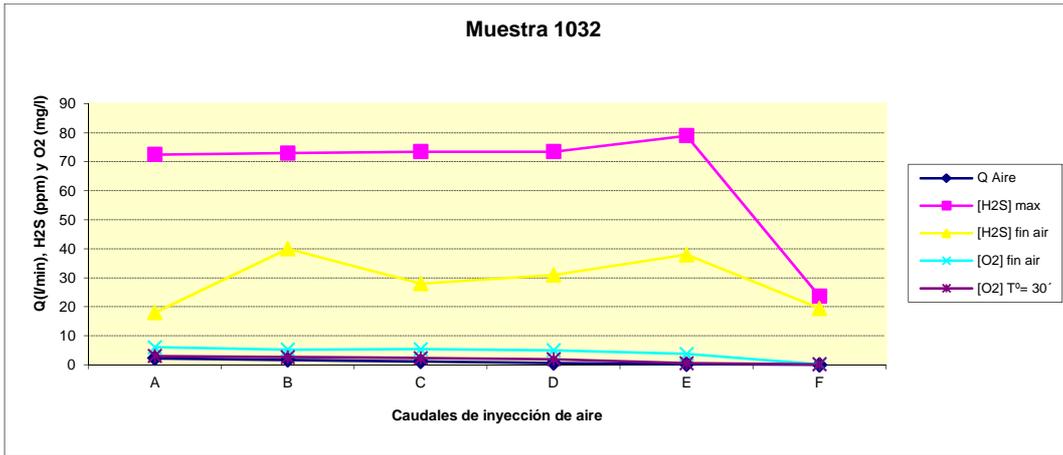


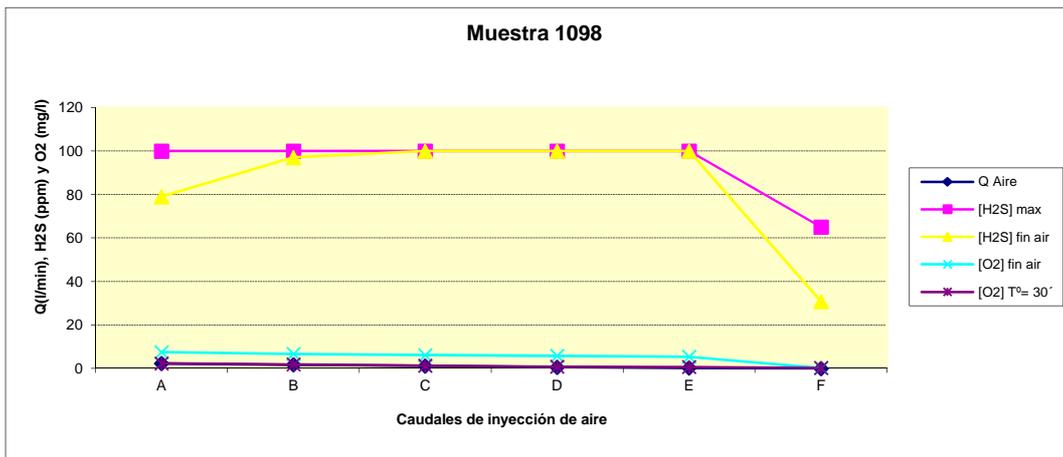
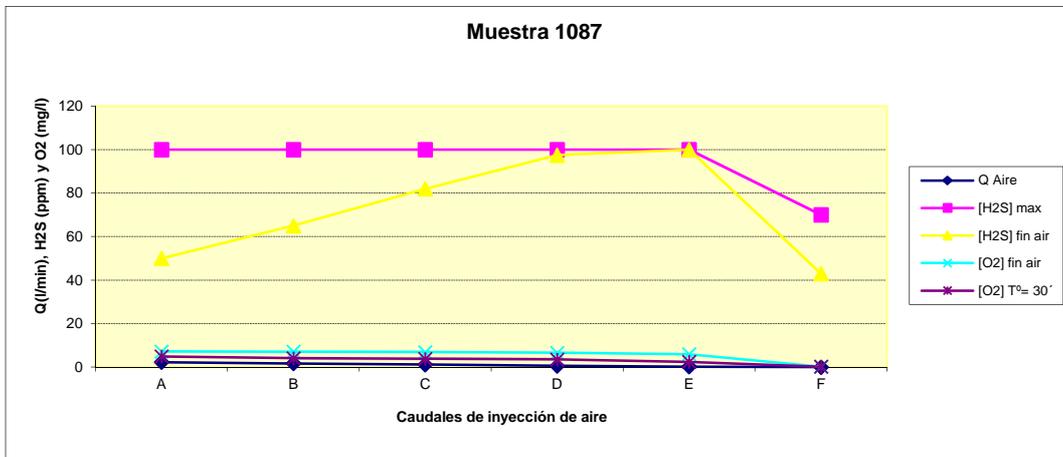
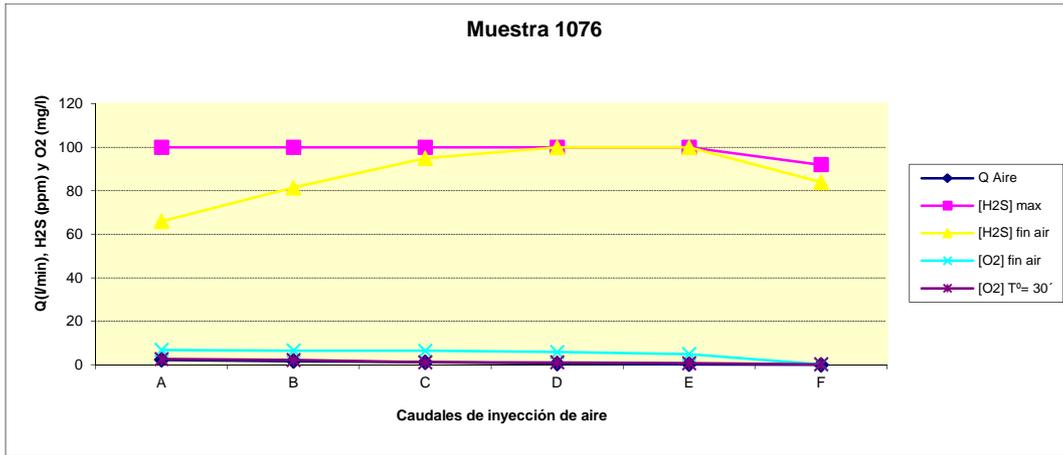
Las gráficas que se presentan a continuación muestran los resultados de la segunda parte del primer ensayo correspondientes a las medidas de ácido sulfhídrico y oxígeno disuelto para cada muestra.

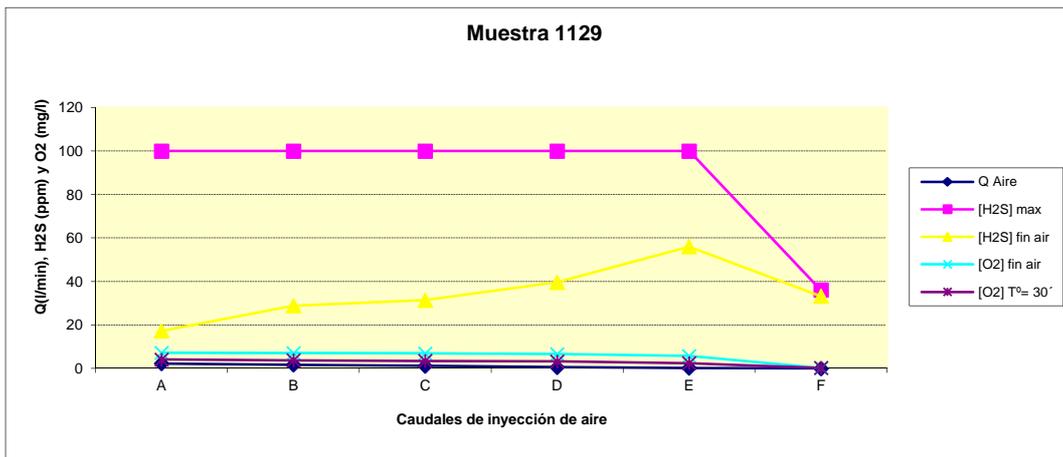
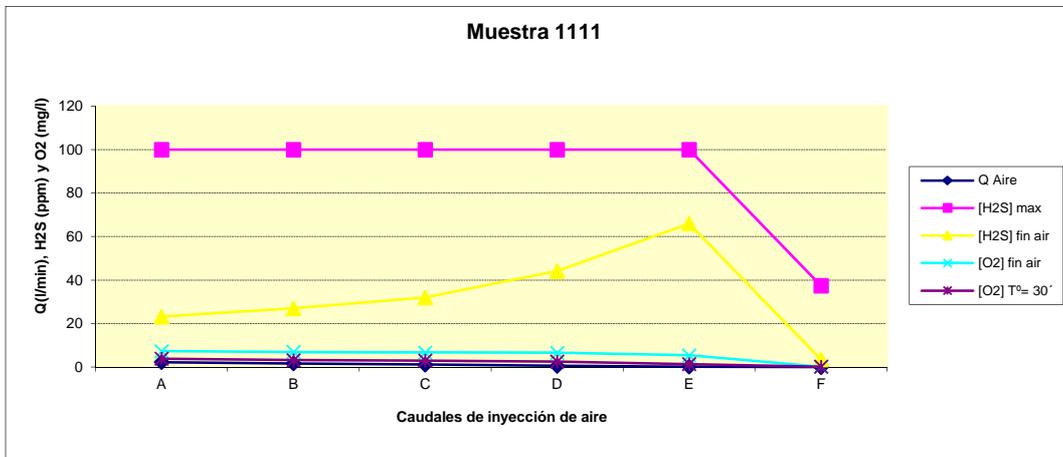
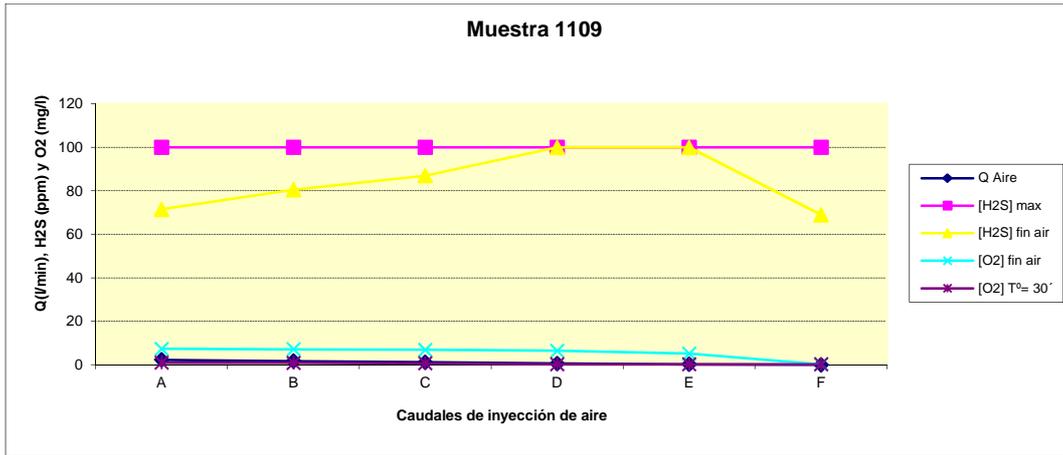
En las gráficas aparecen las medidas del ácido sulfhídrico obtenido como medida máxima y a los 10 minutos de inyección de aire, además también se muestran los niveles conseguidos de oxígeno disuelto al finalizar la inyección de aire y 30 minutos tras su aplicación, todas las medidas vienen referidas a los distintos caudales de inyección de aire aplicados a las submuestras.

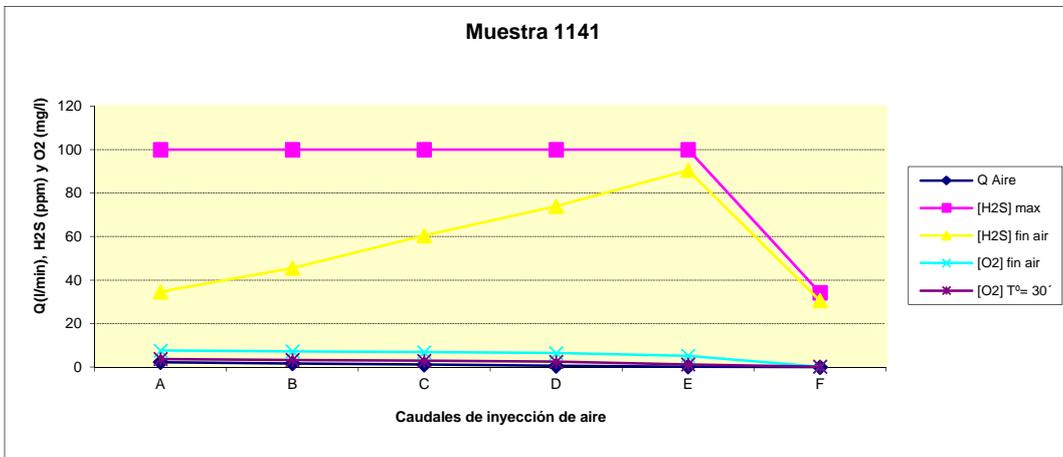
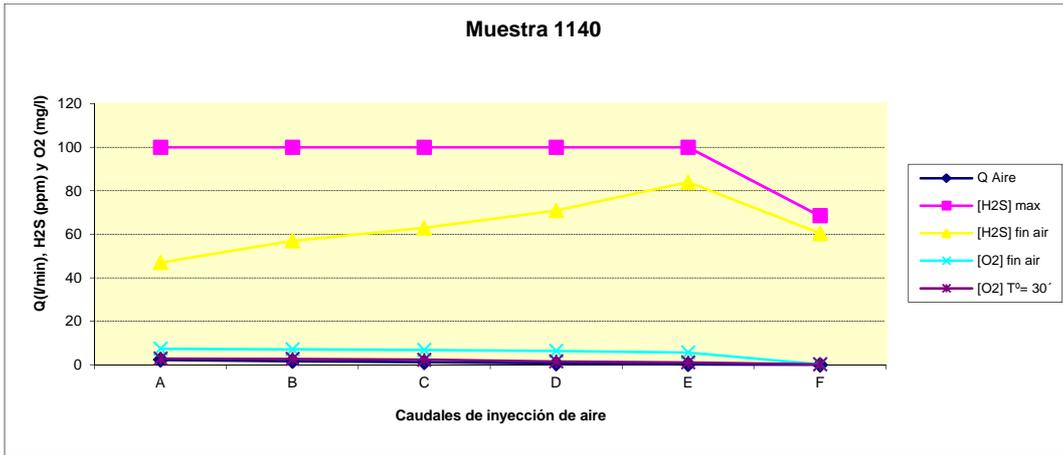












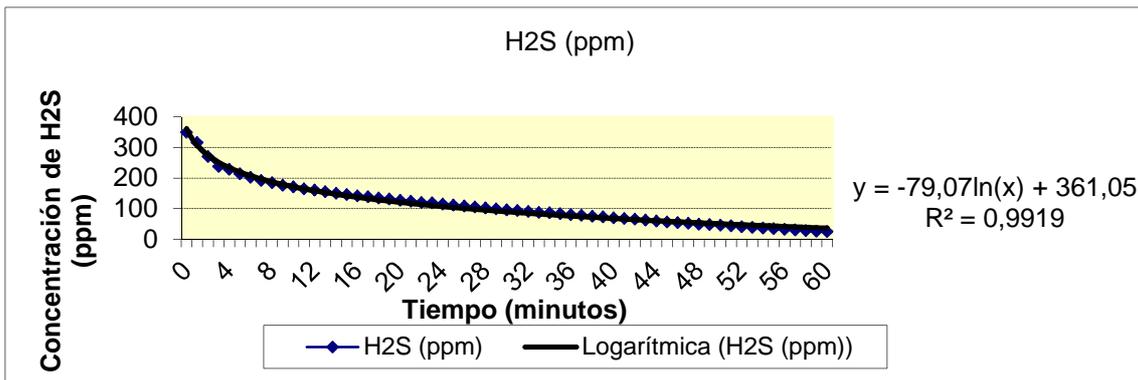
## ANEXO II

El anexo II corresponde a las medidas que se han realizado en el segundo ensayo. Las gráficas que se presentan a continuación muestran los resultados del ensayo de ventilación y en ellas se representa la concentración de ácido sulfhídrico en ppm a lo largo del tiempo, según la tasa de renovación de aire aplicada.

### Muestra 1

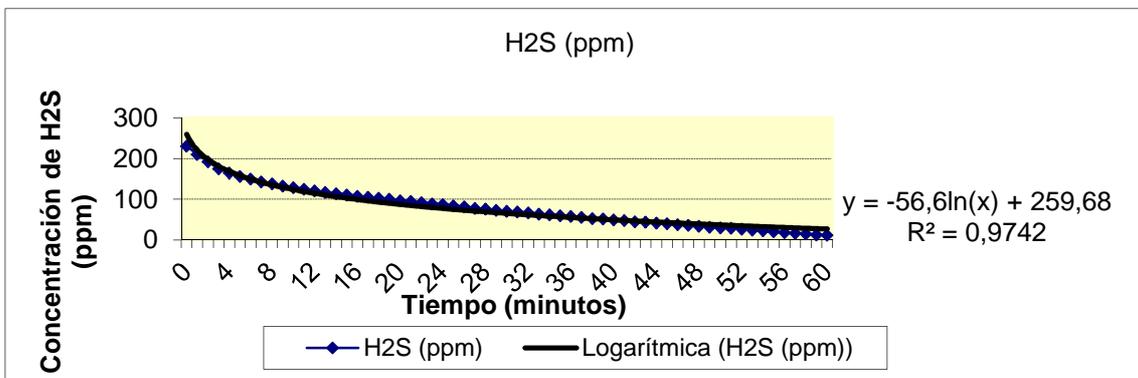
Renovaciones a la hora 8

Nº ensayo	Sulfuros[mg/L] iniciales	Sulfuros[mg/L] finales	Balace sulfuros eliminados [mg/L]
ch7	10	2	9,20



Renovaciones a la hora 13,3

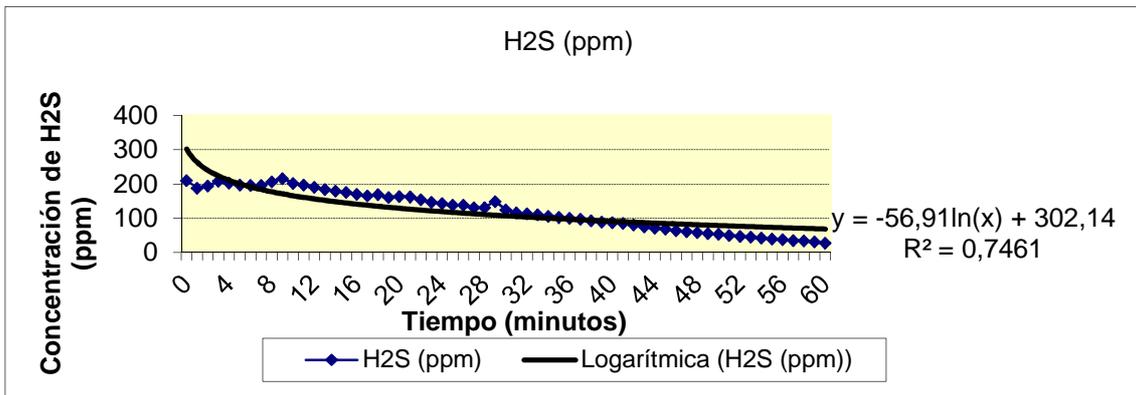
Nº ensayo	Sulfuros[mg/L] iniciales	Sulfuros[mg/L] finales	Balace sulfuros eliminados [mg/L]
ch9	10	3	6,70



Renovaciones a la hora

12

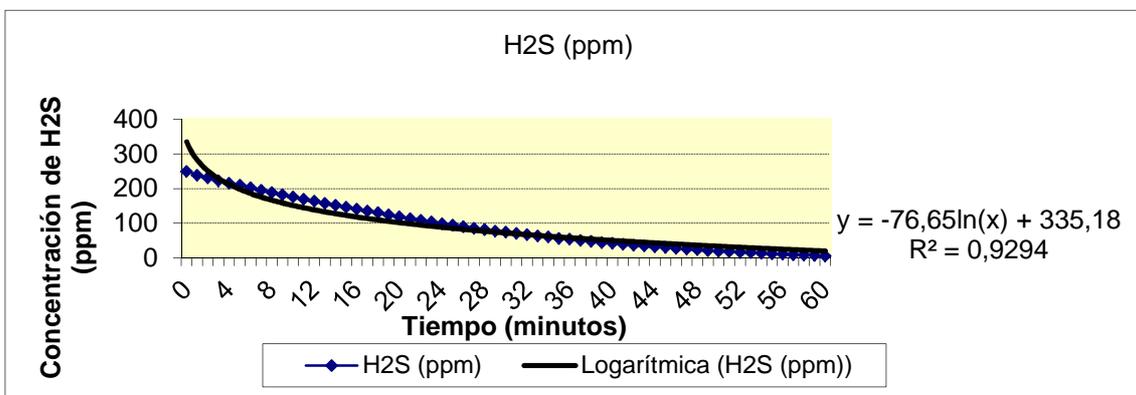
Nº ensayo	Sulfuros[mg/L] iniciales	Sulfuros[mg/L] finales	Balance sulfuros eliminados [mg/L]
ch4	11	1	10,24



Renovaciones a la hora

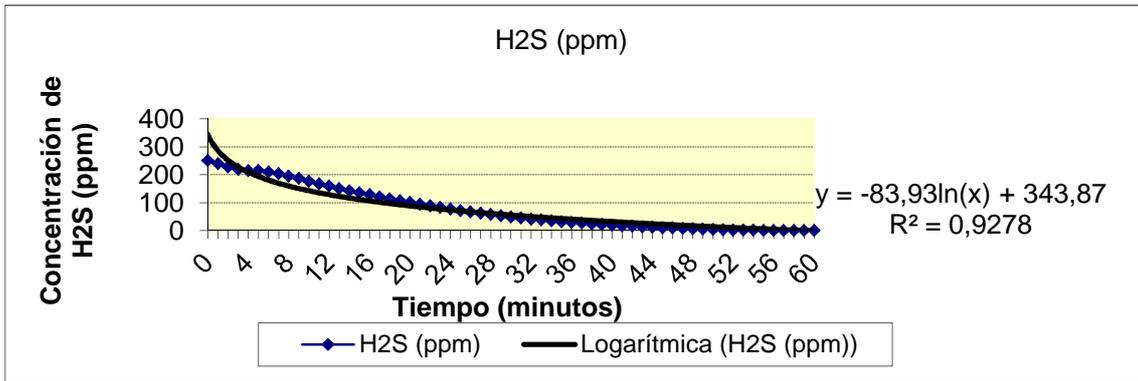
20

Nº ensayo	Sulfuros[mg/L] iniciales	Sulfuros[mg/L] finales	Balance sulfuros eliminados [mg/L]
ch6	11	0,1	7,73



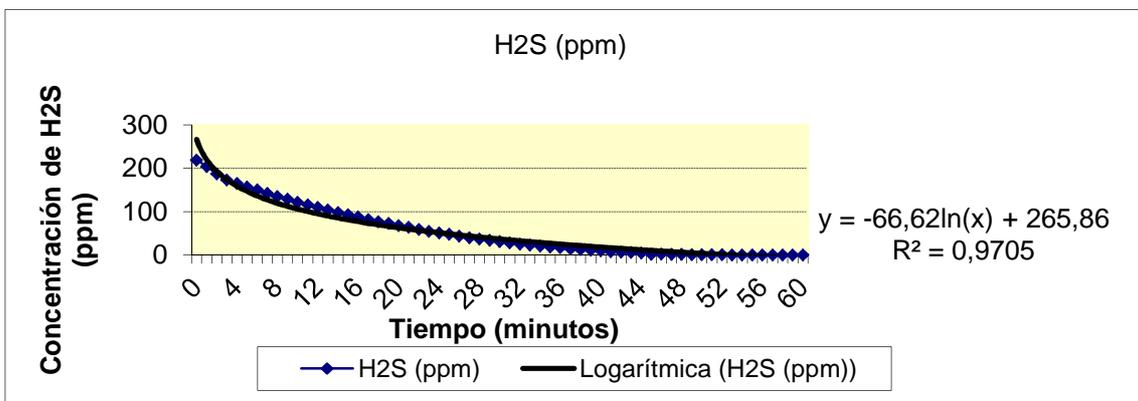
Renovaciones a la hora 26,6

Nº ensayo	Sulfuros[mg/L] iniciales	Sulfuros[mg/L] finales	Balance sulfuros eliminados [mg/L]
ch3	11	0,1	6,52



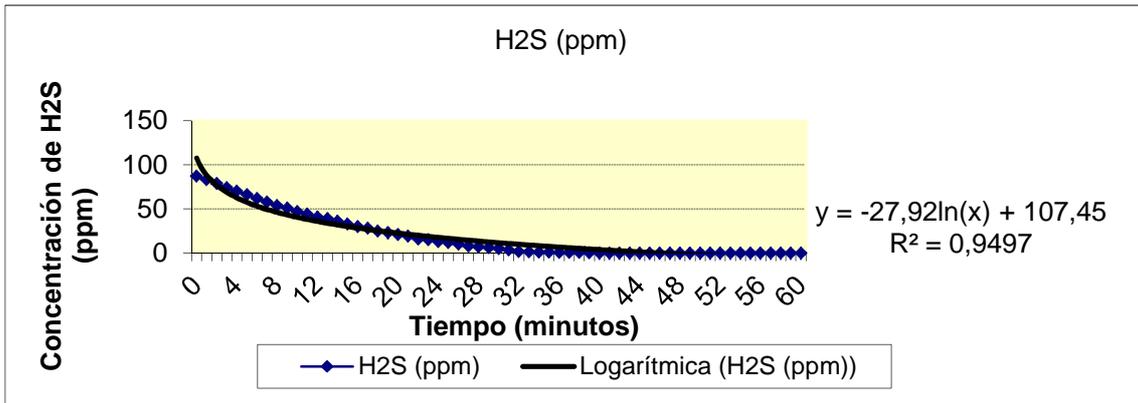
Renovaciones a la hora 16

Nº ensayo	Sulfuros[mg/L] iniciales	Sulfuros[mg/L] finales	Balance sulfuros eliminados [mg/L]
ch1	11	0,2	4,55



Renovaciones a la hora 4,8

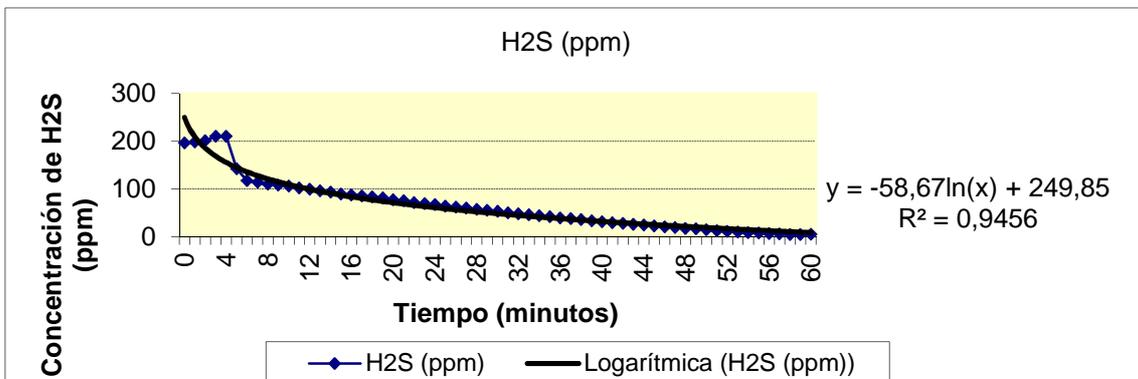
Nº ensayo	Sulfuros[mg/L] iniciales	Sulfuros[mg/L] finales	Balance sulfuros eliminados [mg/L]
ch10	8	0,1	1,57



### Muestra 2

Renovaciones a la hora 8

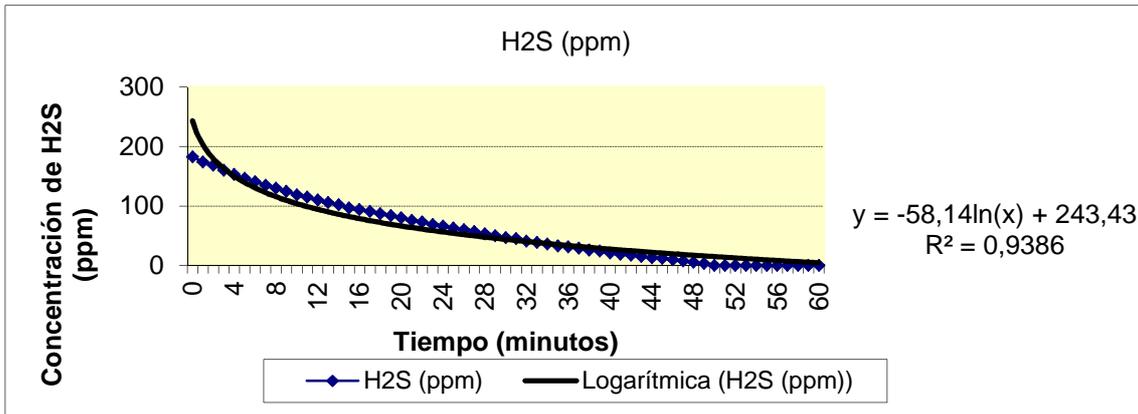
Nº ensayo	Sulfuros[mg/L] iniciales	Sulfuros[mg/L] finales	Balance sulfuros eliminados [mg/L]
ch12	11	0,2	5,34



Renovaciones a la hora

6,4

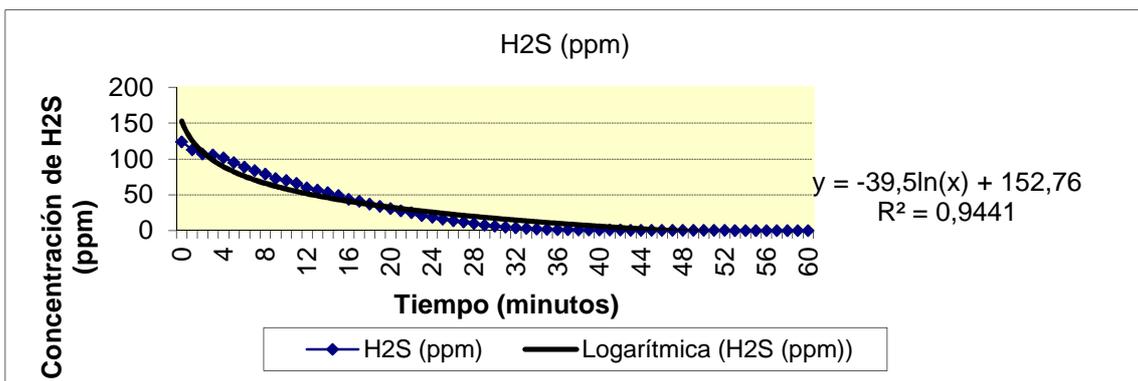
Nº ensayo	Sulfuros[mg/L] iniciales	Sulfuros[mg/L] finales	Balance sulfuros eliminados [mg/L]
ch11	11	0,1	4,95



Renovaciones a la hora

10,6

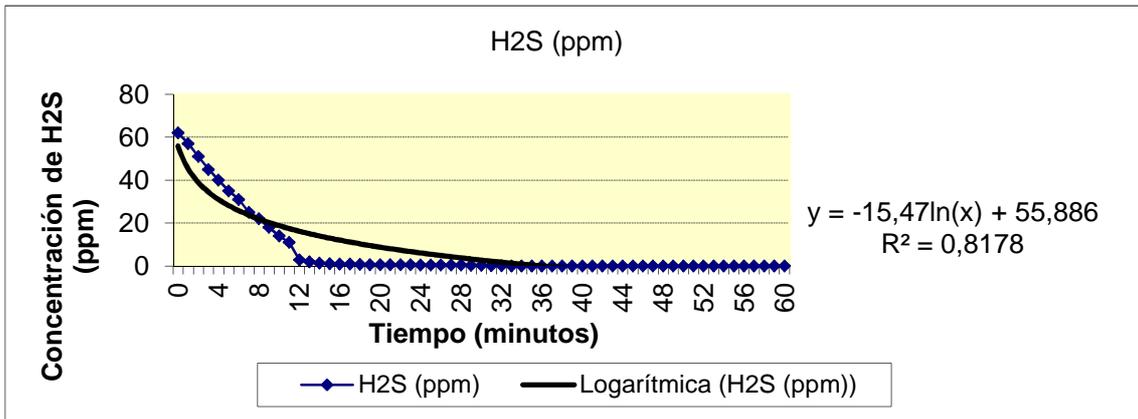
Nº ensayo	Sulfuros[mg/L] iniciales	Sulfuros[mg/L] finales	Balance sulfuros eliminados [mg/L]
ch8	11	0,6	2,29



Renovaciones a la hora

16

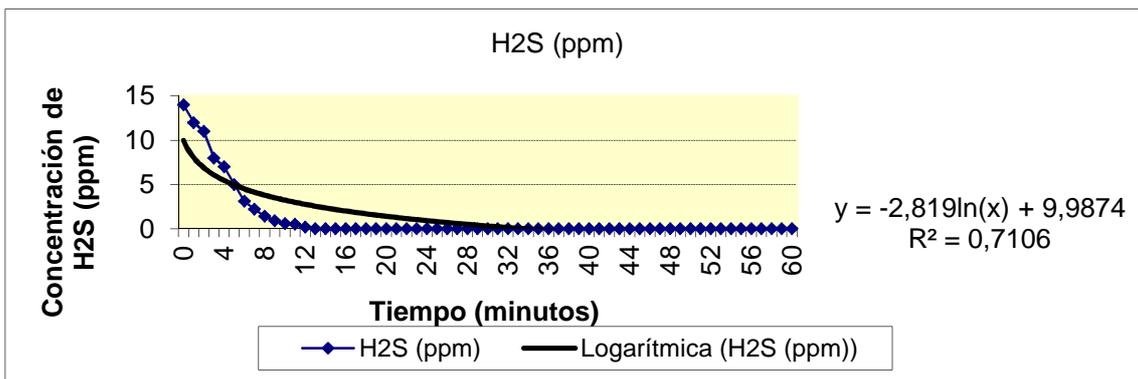
Nº ensayo	Sulfuros[mg/L] iniciales	Sulfuros[mg/L] finales	Balance sulfuros eliminados [mg/L]
ch5	3	0,1	0,55



Renovaciones a la hora

21,3

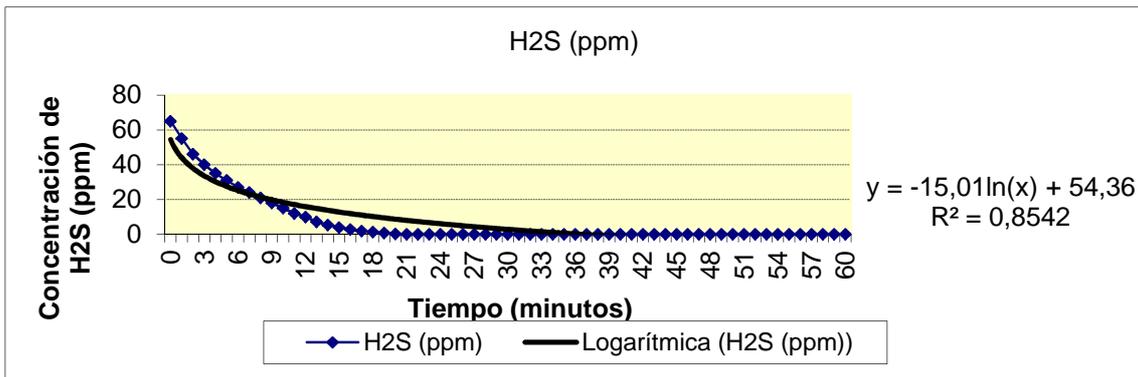
Nº ensayo	Sulfuros[mg/L] iniciales	Sulfuros[mg/L] finales	Balance sulfuros eliminados [mg/L]
ch2	3	0,1	0,08



### Muestra 3

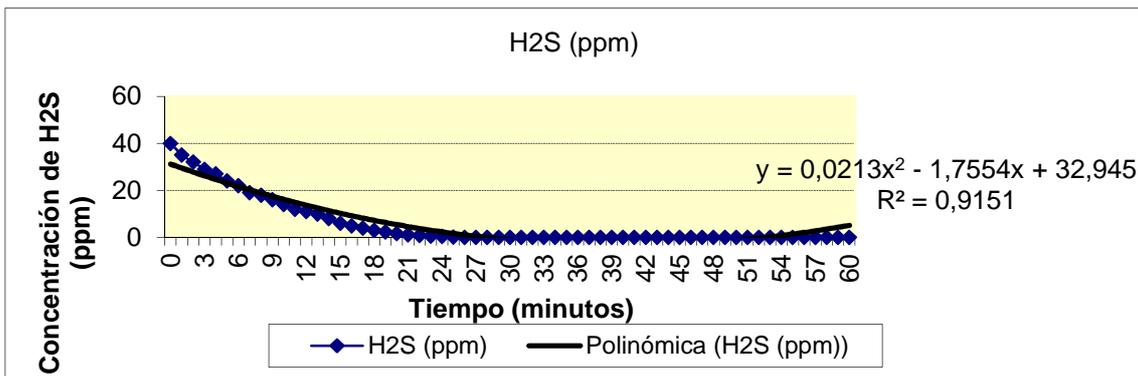
Renovaciones a la hora 26,6

Nº ensayo	Sulfuros[mg/L] iniciales	Sulfuros[mg/L] finales	Balance sulfuros eliminados [mg/L]
ch3	4	0,1	0,54



Renovaciones a la hora 12

Nº ensayo	Sulfuros[mg/L] iniciales	Sulfuros[mg/L] finales	Balance sulfuros eliminados [mg/L]
ch4	4	0,1	0,45

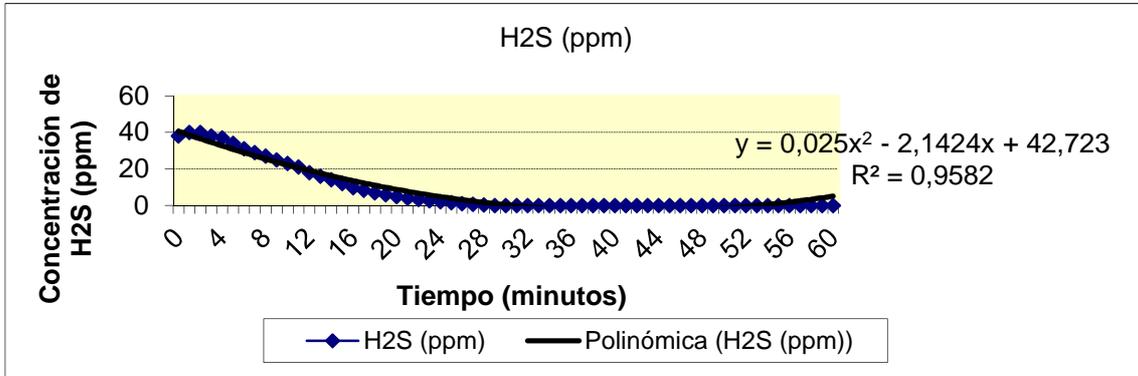


Renovaciones a la hora

16

**Nº ensayo    Sulfuros[mg/L] iniciales    Sulfuros[mg/L] finales    Balance sulfuros eliminados [mg/L]**

ch5                                  4    0,1    0,66

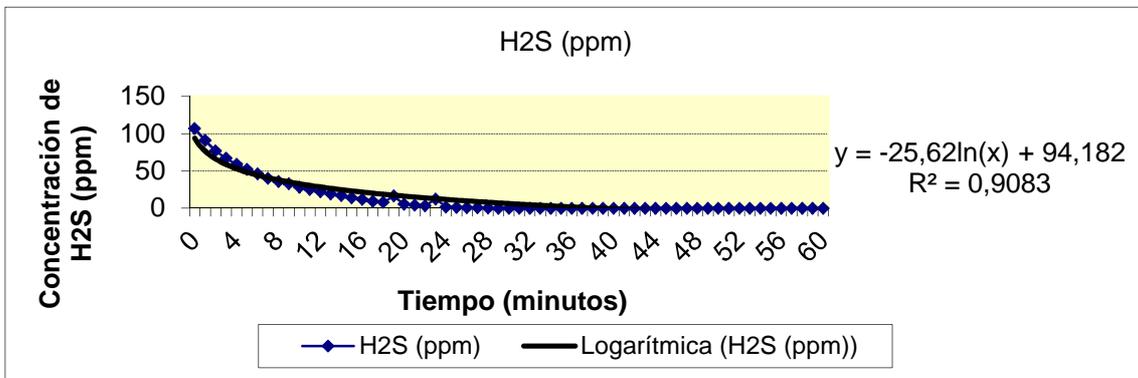


Renovaciones a la hora

16

**Nº ensayo    Sulfuros[mg/L] iniciales    Sulfuros[mg/L] finales    Balance sulfuros eliminados [mg/L]**

ch1                                  13    0,1    1,05

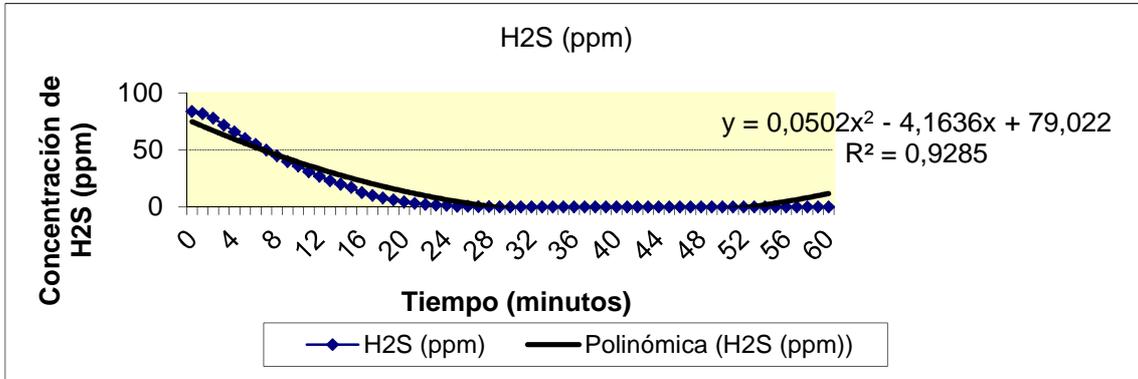


Renovaciones a la hora

21,3

**Nº ensayo    Sulfuros[mg/L] iniciales    Sulfuros[mg/L] finales    Balance sulfuros eliminados [mg/L]**

ch2                                  13    0,1    1,11

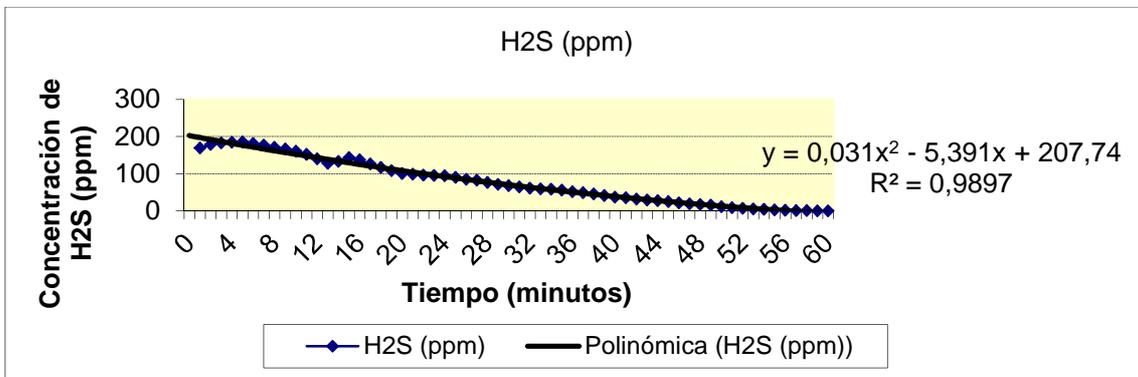


Renovaciones a la hora

26,6

**Nº ensayo    Sulfuros[mg/L] iniciales    Sulfuros[mg/L] finales    Balance sulfuros eliminados [mg/L]**

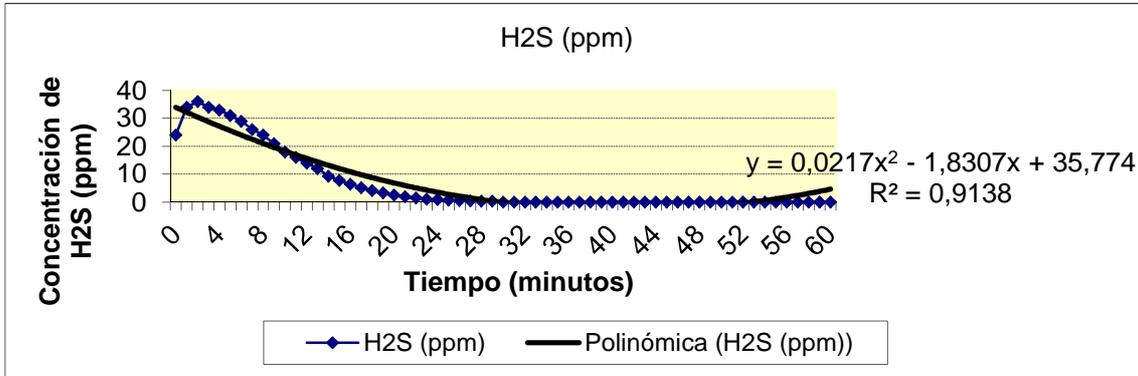
ch3                                  13    0,1    6,56



Renovaciones a la hora

8

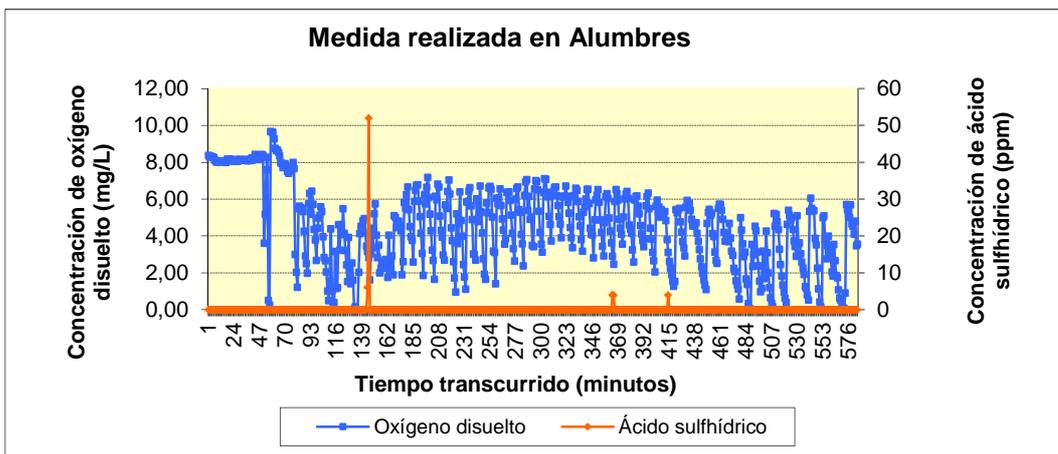
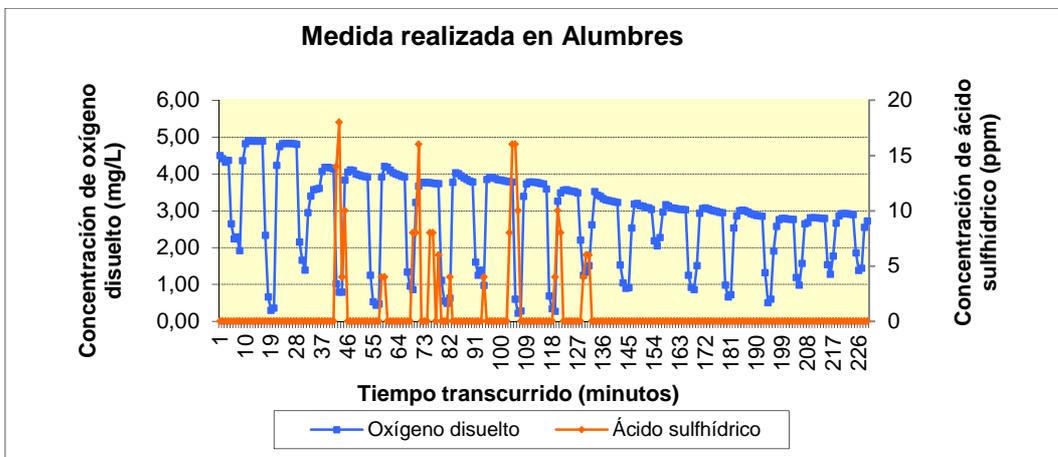
Nº ensayo	Sulfuros[mg/L] iniciales	Sulfuros[mg/L] finales	Balace sulfuros eliminados [mg/L]
ch7	13	0,1	0,54

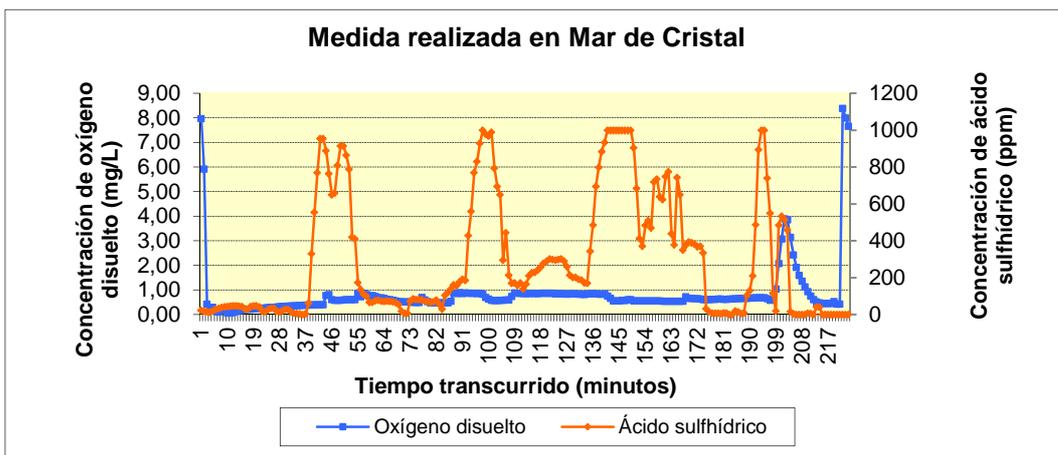
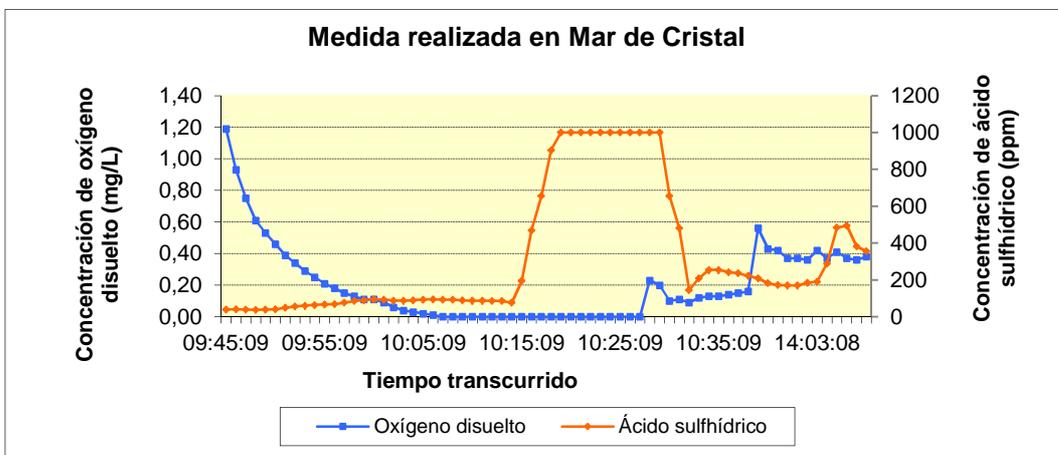
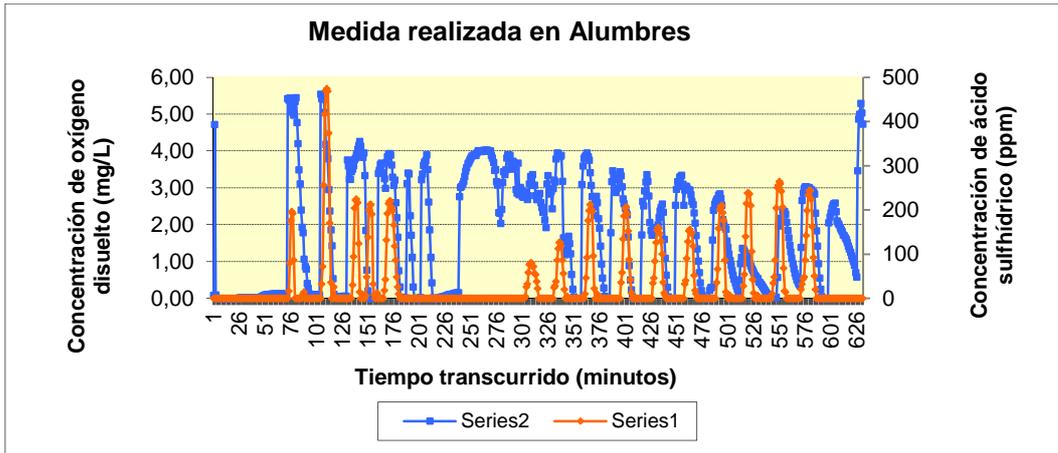


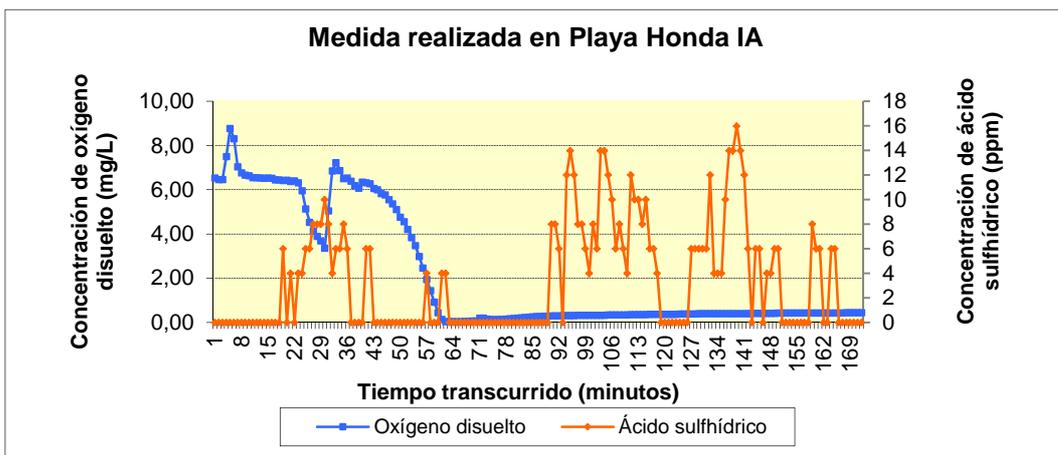
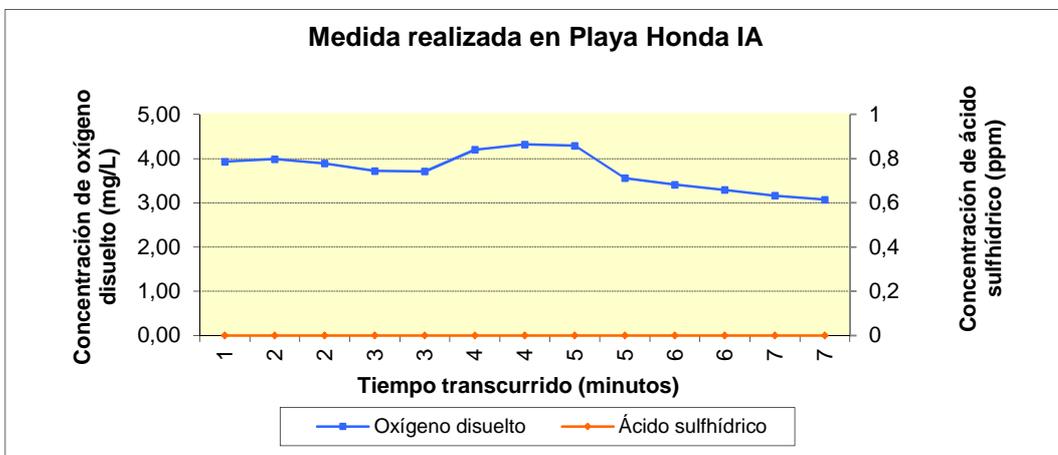
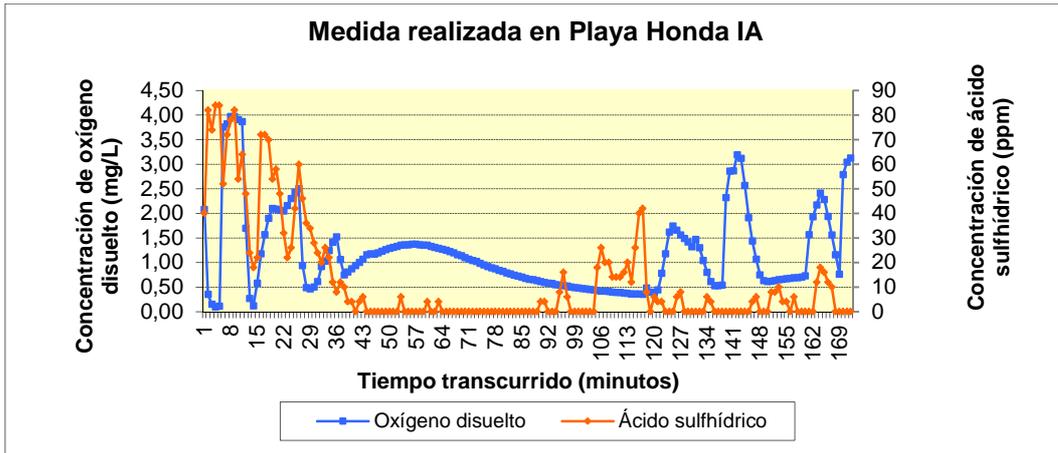
### ANEXO III

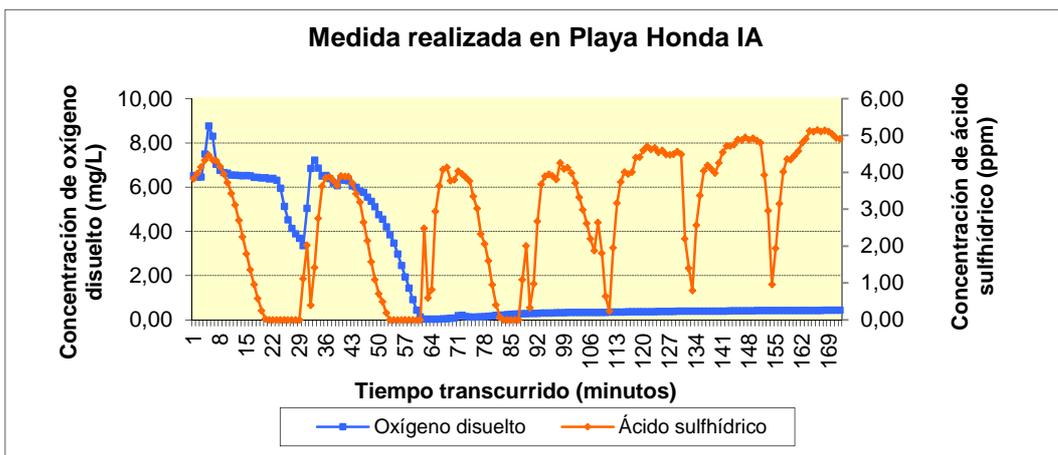
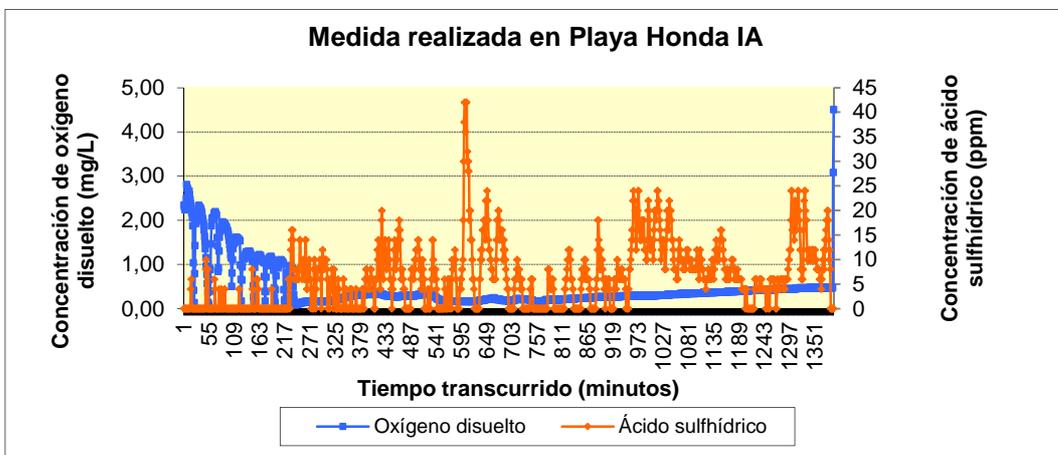
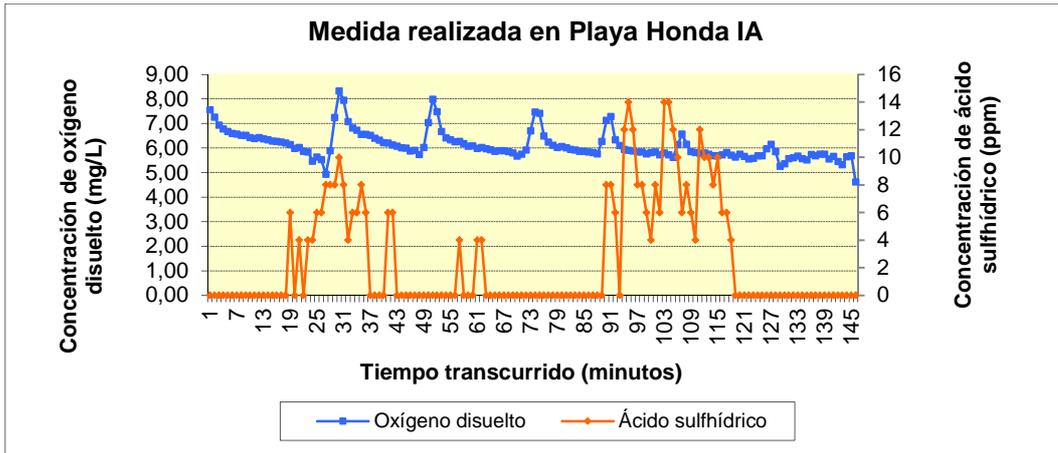
Este anexo está destinado a presentar los gráficos del ensayo de inyección de aire comprimido sobre las tuberías de impulsión de aguas residual, a continuación se muestran las medidas realizadas con la aplicación continua del 10% del caudal de aire respecto al caudal de agua bombeada en cada caso.

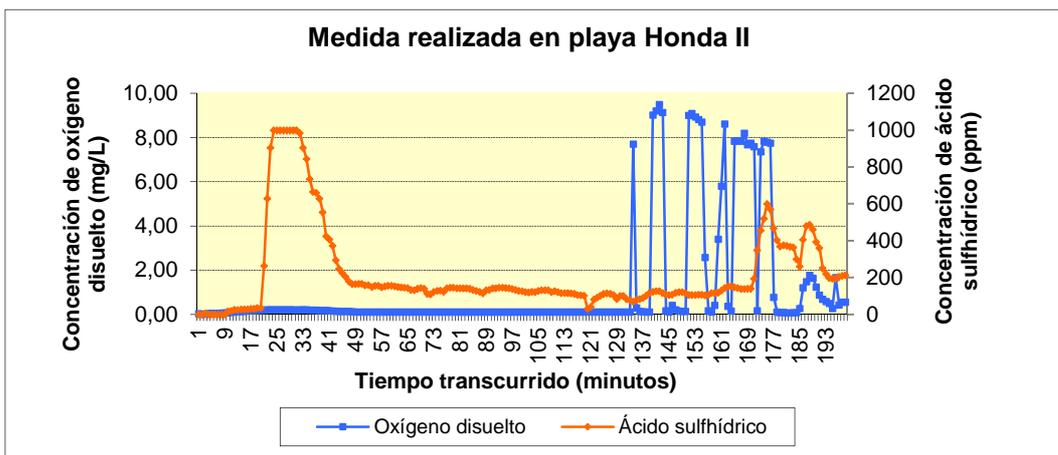
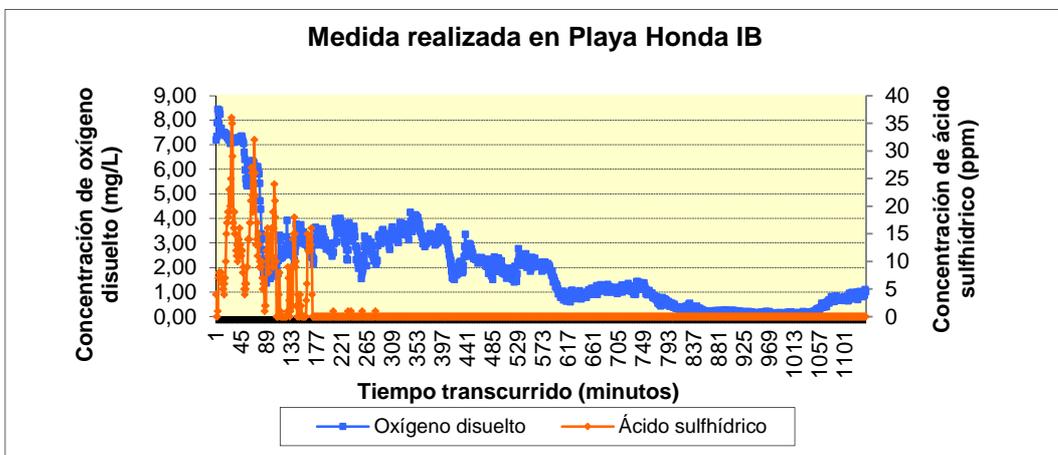
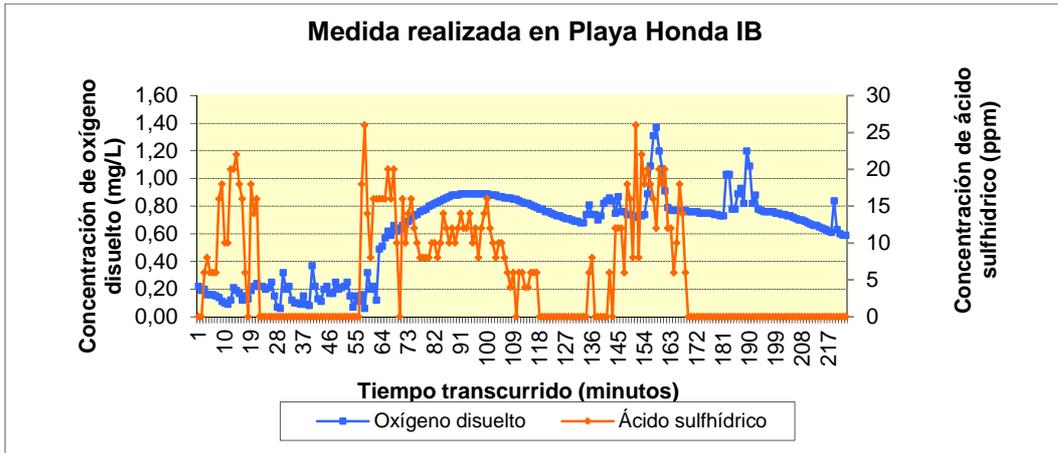
#### Medidas en Alumbres

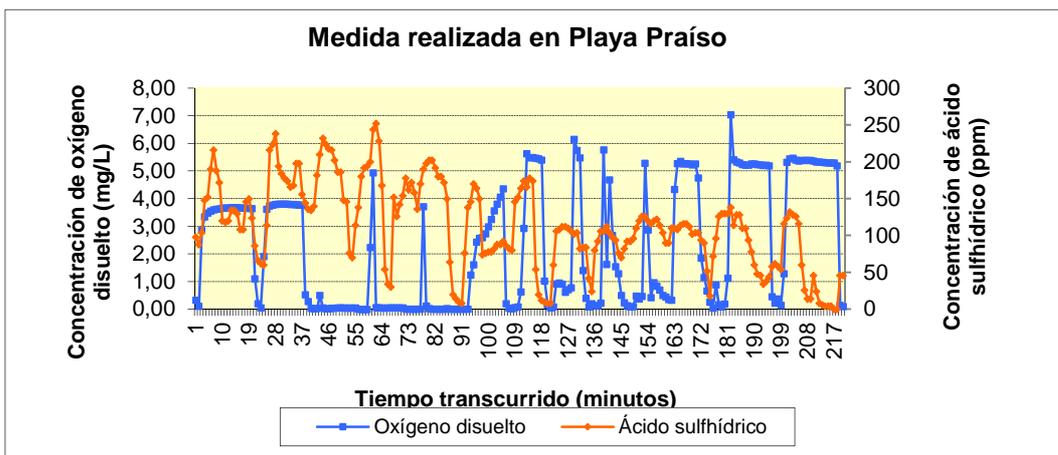
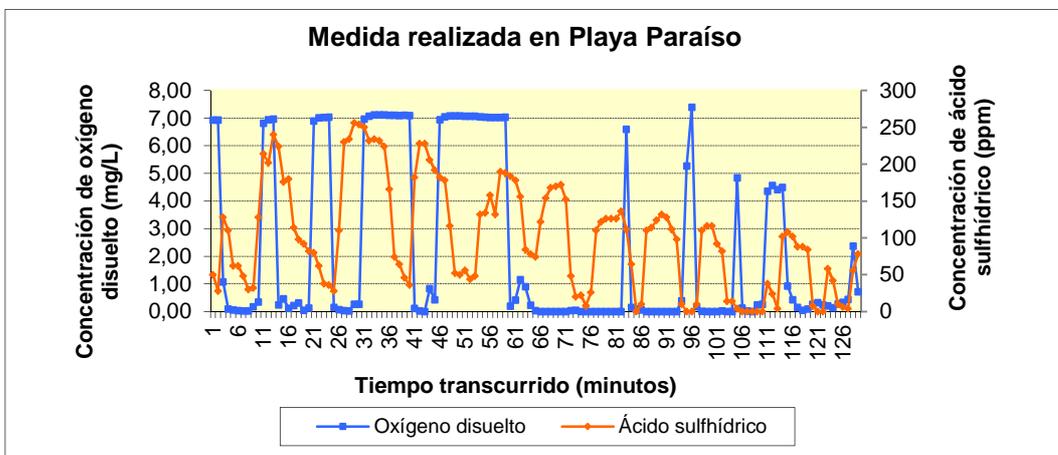
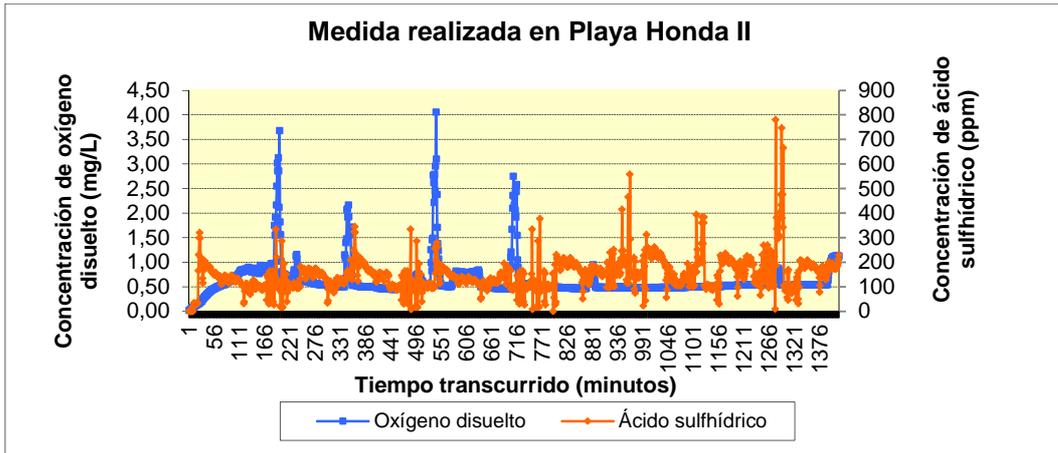


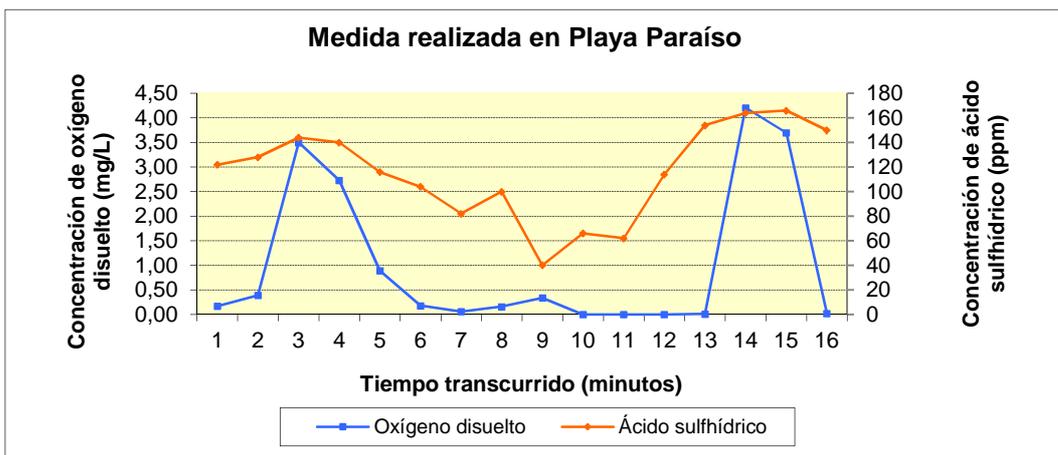
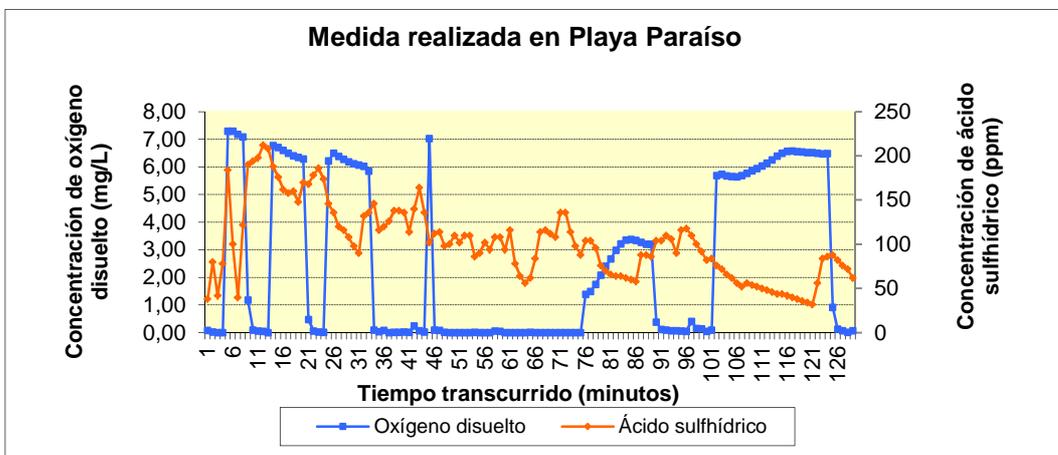
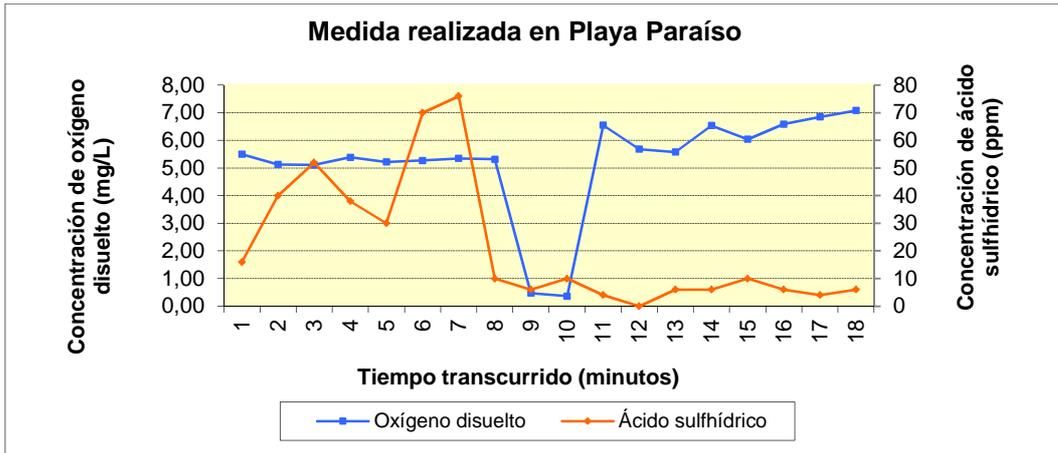


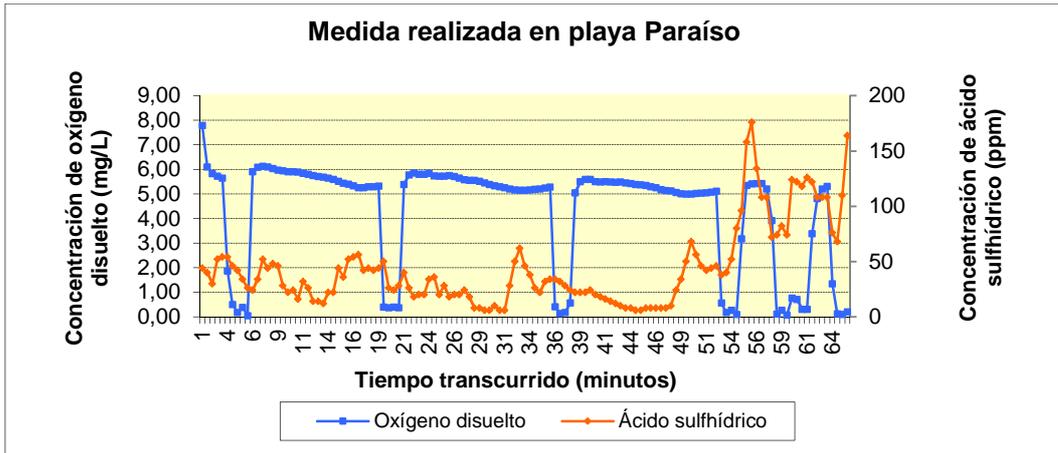












## ANEXO I V

Este anexo presenta la información de los equipos de medición y de los kits de medidas utilizados en los 3 ensayos.

HI 9146

**Oxímetro portátil para medidas de campo**

HI 9146 es un oxímetro impermeable, con microprocesador, dotado de calibración y compensación de la temperatura automática.

Mide y visualiza contemporáneamente en la pantalla de dos niveles, tanto la concentración de oxígeno disuelto (en mg/L o en %) así como la temperatura de la solución a examinar.

Además, es posible programar los valores de altitud y salinidad para una compensación automática de las medidas respecto a estos factores.

La sonda, de dotación, de tipo polarográfica, se suministra completa de una funda protectora de la membrana.

Gracias a la tecla "HOLD", es posible congelar la lectura en la pantalla para anotarla cómodamente.

HI 9146 puede ser alimentado con pilas (con indicador de bajo voltaje que se enciende en la pantalla para avisar al usuario), o a través de adaptador de 12 VDC.





Especificaciones		
	HI 9146-04	HI 9146-10
<b>Rango</b>	de 0.00 a 45.00 mg/L	
<b>Resolución</b>	de 0.0 a 300.0%	
<b>Temperatura</b>	de 0.0 a 50.0°C	
<b>Resolución</b>	0.01 mg/L	
<b>Temperatura</b>	0.1%	
<b>Temperatura</b>	0.1°C	
<b>Presión (p 30°C)</b>	±1.5% FS	
<b>Temperatura</b>	±1.5% FS	
<b>Temperatura</b>	±0.1°C	
<b>Calibración</b>	automática, en aire o 100%	
<b>Compensación temperatura</b>	automática de 0 a 50°C	
<b>Compensación altitud</b>	de 0 a 4 km (resolución 0.1 km)	
<b>Compensación salinidad</b>	de 0 a 30 g/L (resolución 1 g/L)	
<b>Sonda (dotada)</b>	HI 79407/4P con cable de 4 m	HI 79407/10P con cable de 10 m
<b>Alimentación</b>	4 pilas de 1.5V AA / aprox. 100 horas de uso continuo	
<b>Indicador de batería</b>	anti-bloqueo después de 4 horas de inactividad o señal para reemplazar 12 VDC	
<b>Resolución de lectura</b>	de 0 a 50°C, 0.1, máx. 100%	
<b>Dimensiones</b>	186 x 80 x 60 mm	
<b>Peso</b>	300 g	

**Como pedir**

HI 9146-04 se suministra completo con sonda HI 79407/4P con cable 4 m y funda protectora de la membrana, 2 membranas de repuesto, solución electrolítica HI 79418 (20 mL) pilas, manual reducido de transporte e instrucciones.

HI 9146-10 se suministra completo con sonda HI 79407/10P con cable 10 m y funda protectora de la membrana, 2 membranas de repuesto, solución electrolítica HI 79418 (20 mL) pilas, manual reducido de transporte e instrucciones.

**Accesorios**

HI 79418	Solución electrolítica para sonda oxígeno (20 mL)	HI 79407A/P	Membranas de repuesto (2 pil)
HI 79407/4P	Sonda oxígeno disuelto con cable de 4 m y funda protectora de la membrana	HI 710909	Adaptador 110 Vca/12 Vdc
		HI 710906	Adaptador 220 Vca/12 Vdc
		HI 731317	Manual reducido de transporte

HI 79407/10P Sonda oxígeno disuelto con cable de 10 m y funda protectora de la membrana

de, modelo 9146-04



## HI 9828 Medidor multi-paramétrico de Calidad del Agua...



### Características a destacar

- Hasta 12 parámetros en el display
- LCD gráfico con retro-iluminación
- Medidor con Impermeabilidad IP67 y sonda con Impermeabilidad IP68
- T.I.S.— Sistema exclusivo de identificación de Tag que simplifica el registro de datos
- Función Calibración Rápida que calibra todos los sensores con una solución
- Barómetro Integrado
- Comprobación de medición que elimina toda lectura errónea
- Auto-reconocimiento de sonda de pH/ORP
- Función LOGGER que memoriza los datos de todos los sensores conectados
- Registro a demanda y registro automático (hasta 60.000 muestras)
- Puede mostrar datos registrados así como gráficos
- USB para conexión a PC
- Auto-rango de lecturas de CE y TDS
- Función GLP (Buena Práctica de Laboratorio con las últimas 5 calibraciones registradas)
- Todos los sensores pueden ser sustituidos en el campo
- El medidor acepta tanto pilas alcalinas como recargables
- Robusta sonda con punta de acero inoxidable con un diámetro inferior a 2" para pozos y tuberías.

pH • pH/mV • ORP • % saturación OD • mg/l OD • CE • CE absoluto • resistividad • TDS • salinidad • gravedad específica del agua marina • presión atmosférica • temperatura

El nuevo medidor HI 9828 de **HANNA** es un instrumento multi-paramétrico portátil que controla hasta 12 parámetros diferentes de la calidad del agua (8 medidos, 5 calculados). El medidor tiene un LCD multi-línea de puntos de 128 x 64 píxeles retro-Iluminado que adapta el tamaño de los dígitos automáticamente y permite la configuración completa de cada parámetro medido; unidades y selección del idioma, y gráficos en pantalla. Cada parámetro está totalmente apoyado mediante ayuda en pantalla dependiente del contexto tanto en modo calibración como durante la medición. Para controlar y registrar datos, el HI 9828 está equipado con el Sistema exclusivo de identificación de Tag (T.I.S.) de **HANNA**: tags iButton® con números de identificación (ID)

que pueden ser instalados en diversos lugares de muestreo y ser utilizados para registrar datos de cada emplazamiento concreto. El medidor dispone de función GLP completa y la transferencia de datos se realiza vía conexión USB.

Diseñado para ser utilizado al aire libre, el medidor es resistente a los impactos e impermeable (norma IP67) (OD) minutos de inmersión a 1 m de profundidad. La sonda multi-sensor puede ser dejada bajo el agua (norma IP68). Para calibración de campo, la función Calibración Rápida de **HANNA** permite al usuario estandarizar pH, conductividad y oxígeno con una sola solución.

Estudio de la eliminación y de la prevención de la generación de sulfuros en redes de saneamiento

ESPECIFICACIONES		REQUERIMIENTOS
pH	Origen	6.00 a 14.00 pH
	Resolución	0.01 pH
	Precisión	±0.01 pH
mv de entrada de pH	Origen	±0.001 mV
	Resolución	0.1 mV
	Precisión	±0.1 mV
ORP	Origen	±0.001 mV
	Resolución	0.1 mV
	Precisión	±0.1 mV
Oxígeno Disuelto	Origen	0.0 a 10.000 mg/l O <sub>2</sub> a 10.00 mg/l
	Resolución	0.1 mg/l O <sub>2</sub> mg/l
Conductividad	Origen	0.0 a 100.000 µS/cm de conductividad a 1.78 mS/cm que sea mayor; 200.0 a 100.000 µS/cm de conductividad (0.00 a 10.00 mg/l de iones de Cl <sup>-</sup> y 0.17 mg/l de iones de Na <sup>+</sup> ); 30.00 mg/l a 10.000 mg/l a 1% de iones
	Precisión	±0.00 a 200.000 mS/cm (Cl <sup>-</sup> a 400 mS/cm)
Resistividad	Origen	Manual: 1 µS/cm (1001 mS/cm) 0.01 mS/cm (0.1 mS/cm) 1 mS/cm Automática: 1 µS/cm de 0 a 9999 µS/cm; 0.01 mS/cm de 10.00 a 99.99 mS/cm; 0.1 mS/cm de 100.0 a 400.0 mS/cm; Automática mS/cm: 0.001 mS/cm de 0.000 a 9.999 mS/cm; 0.01 mS/cm de 10.00 a 99.99 mS/cm; 0.1 mS/cm de 100.0 a 400.0 mS/cm
	Precisión	±1% de lectura de 0 a 1 µS/cm en que sea mayor
TDS	Origen	0 a 99999.9 µS/cm (0 a 1000.0 mg/cm <sup>3</sup> ) 0 a 10000 mg/cm <sup>3</sup>
	Precisión	±1% de lectura de 0 a 1 mg/l
Sulfuros	Origen	0.0 a 40000 mg/l o ppm (0 ppm) 0.01 mg/l (0.01 ppm) 0.1 mg/l (0.1 ppm)
	Precisión	±1% de lectura de 0 a 1 mg/l
Cantidad específica del Agua Maravá	Origen	Auto-compensado: 1 mg/l (ppm) de 0 a 9999 mg/l (ppm) 0.01 mg/l (ppm) de 10.00 a 99.99 mg/l (ppm) 0.1 mg/l (ppm) de 100.0 a 400.0 mg/l (ppm) Auto-compensado: 0.001 mg/l (ppm) de 0.000 a 9.999 mg/l (ppm) 0.01 mg/l (ppm) de 10.00 a 99.99 mg/l (ppm) 0.1 mg/l (ppm) de 100.0 a 400.0 mg/l (ppm)
	Precisión	±1% de lectura de 0 a 1 mg/l
Sulfuros	Origen	0.00 a 10.00 mg/l (ppm) de sulfuros amoniacales
	Precisión	0.01 mg/l
Cantidad específica del Agua Maravá	Origen	±1% de lectura de 0.10 mg/l en que sea mayor
	Precisión	0.01 a 10.0 mg, mg, mg
Resión Atmosférica	Origen	0.0 a 100.000 mg/l (0 a 10.000 mg/cm <sup>3</sup> ) 0.001 a 10.000 mg/cm <sup>3</sup> (0.0001 a 1.0000 mg/cm <sup>3</sup> ) 0.01 a 10.00 mg/cm <sup>3</sup> (0.001 a 1.0000 mg/cm <sup>3</sup> )
	Precisión	±1 mg/l (ppm) de 0 a 100% de la temperatura durante la calibración
Temperatura	Origen	0.00 a 55.00°C; 32.00°F a 131.00°F; 0.01°C a 100.00°C
	Precisión	±0.1°C; ±0.2°F; 0.01°C
Calibración	pH	Automático 1, 2, o 3 puntos con 5 temporizadores memorizados (pH 4.01, 6.86, 9.18, 12.45, 10.01) y 1 punto personalizado
	ORP	Automático 1 punto personalizado
	Conductividad, Sulfuros	Automático 1 punto con 5 estándares memorizados (4 µS/cm, 541.5 µS/cm, 5.00 mS/cm, 12.86 mS/cm, 80.0 mS/cm, 111.8 mS/cm) o punto personalizado
	TDS	Automático 1 o 2 puntos a 0, 100% o 1 punto personalizado
	Resión Atmosférica, Temperatura	Automático 1 punto personalizado
Temperatura	Automático a 1 punto personalizado	
Construcción de Temperatura	Automático de 0 a 50°C (32 a 119°F)	
Muestra de Registro	Hasta 4000 muestras con 13 mediciones cada una	
Intervalo de Registro	1 segundo a 1 hora	
Resolución de Datos	15.625 bytes (16.000)	
Precisión de Impresibilidad	Medidor 90.1, Sonda 90.0	
Condiciones Medioambientales	0 a 50°C (32 a 121°F) 10% 100%	
Alimentación	14 pilas alcalinas de 1.5V C, 3 pilas 1.5V litio de sec. (continuas en modo Standby) / 4 pilas recargables de 1.2V C, 3 pilas 1.5V litio de sec. (continuas en modo Standby)	
Dimensiones	Medidor: 221 x 110 x 52 mm; Sonda: 205 x 41 mm ØM	
Peso	Medidor: 700g; Sonda: 100g	



## Dräger X-am 5000

El Dräger X-am 5000 pertenece a una nueva generación de equipos desarrollados especialmente para la protección personal. El equipo de detección para 1 a 5 gases mide de manera fiable concentraciones peligrosas de gases y vapores inflamables, así como O<sub>2</sub>, CO, H<sub>2</sub>S, CO<sub>2</sub>, Cl<sub>2</sub>, HCN, NH<sub>3</sub>, SO<sub>2</sub>, PH<sub>3</sub>, H<sub>2</sub>, NO, NO<sub>2</sub> y vapores orgánicos (OV).



### DISEÑO ERGONÓMICO

A pesar de su amplia funcionalidad, el Dräger X-am 5000 destaca por su pequeño y su formato de móvil y garantiza al usuario una gran comodidad de transporte. Reducido a lo esencial, el panel de control de dos botones y el sencillo menú facilitan el uso intuitivo del equipo.

### TECNOLOGÍA DURADERA DEL SENSOR

El Dräger X-am 5000 está equipado con la nueva generación de eficaces sensores electroquímicos de larga vida miniaturizada XRS.

La larga vida de uso del sensor catalítico unido a la garantía opcional de 5 años de los sensores de oxígeno, ácido sulfhídrico y monóxido de carbono son únicos en el mercado.

### INSTALACIÓN FLEXIBLE DE SENSORES

Gracias a la posibilidad de una instalación individual el Dräger X-am 5000 tiene mayor número de aplicaciones, incluido el alquiler. Los sensores pueden ser sustituidos, cambiados o ajustados a otros gases con gran facilidad.

### INNOVADOR SENSOR CAT EX

El sensor catalítico mide concentraciones de 0-100% LEL y de 0-100 Vol% metano. El concepto de calibración facilita el ajuste con vapores. Con la máxima sensibilidad el equipo avisa de forma rápida de peligros de gases desconocidos.

### ROBUSTO Y ESTANCO AL AGUA

El Dräger X-am 5000 es robusto: protegido contra agua y polvo según IP 67 el equipo garantiza incluso después de una caída en agua un óptimo funcionamiento. La protección de goma integrada así como los sensores resistentes a los golpes ofrecen una seguridad adicional en caso de golpes y vibraciones. Además el Dräger X-am 5000 tiene protección total a las radiaciones electromagnéticas.

### BOMBA DE ASPIRACIÓN EXTERNA

Una bomba externa opcional que puede ser utilizada con un tubo de hasta 20 m de longitud, es la solución ideal para aplicaciones en mediciones de entrada en espacios confinados así como control en tanques, pozos, etc. Al introducir el equipo de medición la bomba se activa automáticamente.



Dräger X-am 5000  
El equipo de detección de gases más pequeño y robusto.

### CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS

Medidas (largo x alto x ancho)	49x 130 x 44 mm, 1.68x 5.12x 1.73 in.	
Peso	aprox. 350 g, 0.9 lb	
Condiciones ambientales	Temperatura	-20 a +50 °C, -4 a +122 °F
	Presión	700 a 1020 hPa
	Humedad	50 a 95% RH
Alarmas	Óptica	30°
	Acústica	Múltiple > 90 dB a 10 cm
	Vibración	
Índice de Protección	IP 67	
Tiempo de funcionamiento	> 12 h, con funcionamiento a intervalos en el modo ahorro de energía > 40 h	
Tiempo de carga	< 4 h	
Data logger (memoria de datos)	Legible mediante interface RS, aprox. 1000 h con el gas y un intervalo de registro de 1 valor por minuto	
Funcionamiento con bomba	Longitud de tubo máximo 20 m, 66 pies	
Certificaciones	ATEX	I MT Ex ia I II 1G Ex ia IIC T3 (Zone 0) I Mb Ex ia I II 2G Ex ia IIC T4/T3 Certificados de funcionamiento de medida según: EN 61791-4 (para sensor catalítico directo metano hasta metano) EN 61791-2 (para CO y H <sub>2</sub> ) EN 61791 (para O <sub>2</sub> ) EN 61791 (software)
	UL	Clase I y 2, de L grupos A, B, C, D, Código 7E T4/T3
	CSA	Clase I, Div 1 Grupos A, B, C, D
	IECEx	Ex ia I Ex ia IIC T3 Ex ia I Ex ia IIC T4/T3
Marca CE	Compatibilidad electromagnética (directiva 2004/108/CE)	
MEI	Directiva de equipos para la Marca CE/EMC	

## Kit de Sulfato CHEMETRICS®



### SULFATO

#### Método

Referencias: APHA Standard Methods, 153 ed., p. 436, método 425 C (1980). Métodos Químicos USEPA para Análisis de Aguas y Residuos, método 375.4 (1983). ASTM D 516-90 (1995), Ion Sulfato en Agua.

El sulfato está ampliamente distribuido en la naturaleza, pudiendo estar presente en agua natural en concentraciones variables. A ciertos niveles en aguas potables, afecta al sabor. Los niveles de sulfato se miden también en las Industrias de bebidas debido a su efecto en el olor y el sabor. Los sulfatos deben ser controlados en sistemas de refrigeración e intercambiadores de iones para prevenir la formación de incrustaciones de sulfato cálcico.

El kit Vacu-vials® para sulfatos emplea el método turbidimétrico. El ion sulfato reacciona con el cloruro bórico en solución ácida para formar una suspensión de cristales uniformes de sulfato de bario. La turbidez resultante es proporcional a la concentración de sulfato en la muestra. Los resultados se expresan en ppm (mg/L) de SO<sub>4</sub>.



### Kits fotométricos

#### Sulfato

##### Kit Vacu-vials

Rango: 8,0 - 100,0 ppm

Método: Turbidimétrico

El kit se presenta en caja de cartón y contiene todo lo necesario para realizar 30 tests: 30 ampollas, Solución Acidificante, Activador sólido, ampolla para blanco, instrucciones, tabla de calibración y Ficha de Datos de Seguridad.

Los Kits Vacu-vials requieren el uso del [Fotómetro V-2000](#) o un espectrofotómetro que acepte cubetas de 13 mm de diámetro. El instrumento se vende por separado.

## Sulfite (free)

www.chemetrics.com | 1-800-356-3072

### Methods

#### Sulfite

References: ASTM D 1339-84, Sulfite Ion in Water, Test Method C. APHA, Standard Methods, 21<sup>st</sup> ed., Method 4500-SO<sub>2</sub>-B (2005). USEPA Methods for Chemical Analysis of Water and Wastes, Method 377.1 (1983).

Sulfite is not usually present in surface waters. If sulfite is discharged in effluents or from domestic wastewaters, it readily oxidizes to form sulfate. Sodium sulfite is the most common form of sulfite and is an excellent reducing agent with applications as an oxygen scavenger. Sulfite concentrations in boiler and process waters must be monitored routinely to avoid overtreatment. Wastewater treatment plants that use sulfur dioxide to remove excess chlorine must monitor their effluents for sulfite.

CHEMetrics' sulfite test kits employ the iodometric chemistry in which sulfite is titrated with iodide-iodate titrant in an acid solution using a starch indicator. This sulfite will titrate as sulfite. Results are expressed as ppm (mg/L) SO<sub>2</sub>.

#### Sulfite in Wine

References: ASTM D 1339-84, Sulfite Ion in Water, Test Method C. APHA, Standard Methods, 21<sup>st</sup> ed., Method 4500-SO<sub>2</sub>-B (2005). USEPA Methods for Chemical Analysis of Water and Wastes, Method 377.1 (1983).

Sulfites have been used for centuries to sanitize and preserve foods. They are used worldwide in the wine industry as antioxidant and antimicrobial agents. However, sulfites have been identified as causative agents in certain allergic reactions suffered by asthmatics. As a result, the FDA and the Bureau of Alcohol, Tobacco, and Firearms have mandated that sulfites in foods and beverages, at levels of 10 ppm or higher, be identified on the label.

CHEMetrics' sulfite test kit is based on the Ripper method, which the wine industry has used for years as a standard for rapid sulfite analysis. Sulfite is titrated with an iodide-iodate solution, using a starch end point indicator. Phosphoric acid is used to adjust the pH of the sample. Results are quantified using direct-reading titration cells. The test determines free sulfite as ppm (mg/L) SO<sub>2</sub>.

Results for this test kit are acceptable for dry white wines (although they can have an error of up to 10 ppm). This test kit is not recommended for use with red wines or white wines containing ascorbic acid or tannin. These wines often give false high test results.

### Visual Kits

<b>Range: 2-30 ppm as SO<sub>2</sub></b> MDL: 2.0 ppm / Method: Iodometric	
<b>Sulfite Titrate Kit</b>	<b>Kit #</b> <b>K-902</b>
Increments: 2.0, 2.2, 2.4, 2.6, 2.8, 3.0, 3.2, 3.4, 4.0, 5.0, 6.0, 7.0, 8.0, 10, 14, 20 ppm	
Kit comes in a cardboard box and contains everything needed to perform 30 tests: 30 ampoules with vials assemblies, Neutralizer Solution, Indicator, 25 ml sample cup, instructions, and MSDS.	

<b>Range: 5-50 ppm as SO<sub>2</sub></b> MDL: 5.0 ppm / Method: Iodometric	
<b>Sulfite Titrate Kit</b>	<b>Kit #</b> <b>K-905</b>
Increments: 5.0, 6.0, 6.5, 7.0, 7.5, 8.0, 9.0, 10.0, 12.0, 14.0, 17.5, 20.0, 25.0, 30.0, 50.0 ppm	
Kit comes in a cardboard box and contains everything needed to perform 30 tests: 30 ampoules with vial assemblies, Neutralizer Solution, Indicator, 25 ml sample cup, instructions, and MSDS.	

<b>Range: 10-100 ppm as SO<sub>2</sub></b> MDL: 10 ppm / Method: Iodometric	
<b>Sulfite Titrate Kit</b>	<b>Kit #</b> <b>K-910</b>
Increments: 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 18, 20, 25, 30, 35, 40, 50, 75, 100 ppm	
Kit comes in a cardboard box and contains everything needed to perform 30 tests: 30 ampoules with vial assemblies, Neutralizer Solution, Indicator, 25 ml sample cup, instructions, and MSDS.	

<b>Range: 50-500 ppm as SO<sub>2</sub></b> MDL: 50 ppm / Method: Iodometric	
<b>Sulfite Titrate Kit</b>	<b>Kit #</b> <b>K-920</b>
Increments: 50, 60, 80, 100, 120, 150, 200, 250, 300, 350, 500 ppm	
Kit comes in a cardboard box and contains everything needed to perform 30 tests: 30 ampoules with vial assemblies, Neutralizer Solution, Indicator, 25 ml sample cup, instructions, and MSDS.	

## Sulfide

www.chemetrics.com | 1-800-356-3072

### Method

References: USEPA Methods for Chemical Analysis of Water and Wastes, Method 376.2 (1983), APHA Standard Methods, 21<sup>st</sup> ed., Method 4500-S<sup>2</sup>-D (2005).

Sulfides are naturally present in ground waters as a result of leaching from sulfur-containing mineral deposits. Surface waters do not usually contain high sulfide concentrations. Sulfides result from the decomposition of organic matter, from bacterial sulfate reduction under anaerobic conditions and from various chemical processes.

CHEMetrics test kits measure total acid soluble sulfides and employ the methylene blue methodology. Sulfides react with dimethyl-p-phenylenediamine in the presence of ferric chloride to produce methylene blue. Results are expressed as ppm (mg/L) S.

### Visual Kits

Range: 0-1 & 1-10 ppm MCL: 0.05 ppm / Method: Methylene Blue	
<b>CHEMets Kit</b>	<b>Kit#</b>
CHEMets Refil, 30 ampoules	B-9510
Activator Solution Pack, six 10 ml bottles	A-9500
Low Range Comparator 0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0 ppm	C-9501
High Range Comparator 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 10 ppm	C-9510
Kit comes in a plastic case and contains everything needed to perform 30 tests: Refil, Low and High Range Comparator, Activator Solution, 25 ml. sample cup, instructions, and MSDS.	

Range: 0-30 & 30-300 ppm MCL: 3 ppm / Method: Methylene Blue	
<b>VACUettes Kit</b>	<b>Kit#</b>
VACUettes Refil, 30 ampoules	B-95100
Activator Solution Pack, six 10 ml bottles	A-9500
Low Range Comparator 0, 5, 7.5, 10, 15, 20, 25, 30 ppm	C-95010
High Range Comparator 30, 60, 90, 120, 150, 175, 200, 250, 300 ppm	C-95100
Kit comes in a plastic case and contains everything needed to perform 30 tests (except distilled water): Refil, Low and High Range Comparator, Activator Solution, diluter wrapper cup, micro test tube, instructions, and MSDS.	

Range: 0-60 & 60-600 ppm MCL: 10 ppm / Method: Methylene Blue	
<b>VACUettes Kit</b>	<b>Kit#</b>
VACUettes Refil, 30 ampoules	B-9510A
Activator Solution Pack, six 10 ml bottles	A-9500
Low Range Comparator 0, 10, 15, 20, 30, 40, 50, 60 ppm	C-9501A
High Range Comparator 60, 120, 180, 240, 300, 360, 400, 500, 600 ppm	C-9510A
Kit comes in a plastic case and contains everything needed to perform 30 tests (except distilled water): Refil, Low and High Range Comparator, Activator Solution, diluter wrapper cup, micro test tube, instructions, and MSDS.	



## Thiosulfate

www.chemetrics.com | 1-800-356-3072

### Method

Reference: APHA Standard Methods, 21<sup>st</sup> ed., Method 4500-SO<sub>3</sub><sup>2-</sup>-B (2005).

Thiosulfate is an excellent reducing agent. It is used primarily as an antichlor or chlorine-removing agent in various chemical processes, including the bleaching of pulp, paper, and textiles.

CHEMetrics' method employs the iodometric chemistry. Although sulfite usually titrates as thiosulfate, the reagent has been formulated to inhibit high-level sulfite interferences. Thiosulfate is titrated with iodide-iodate titrant in acid solution using a starch indicator. Results are expressed as ppm (mg/L) S<sub>2</sub>O<sub>3</sub><sup>2-</sup>.

### Visual Kits

Range: 0-50 ppm MDC: 5.0 ppm / Method: Iodometric	
<b>Titrate Kit</b>	<b>Kit#</b>
	<b>K-3705</b>
Increments: 5.0, 5.5, 6.0, 6.5, 7.0, 7.5, 8.0, 9.0, 10.0, 12.5, 15.0, 17.5, 20.0, 25.0, 30.0, 50.0 ppm	
Kit comes in a cardboard box and contains everything needed to perform 30 tests: thirty ampoules with valve assemblies, Neutralizer Solutions, Starch, 25 ml sample cup, instructions, and MSDS.	

### Kit Components common to Thiosulfate

Description	Kit#
Sample Cup Pack, 25 ml (6 ea)	A-0015
Starch Pack (1 ea)	A-0053

Instructions are posted on our website.  
If no shelf life is listed for a product, then the shelf life is at least 3 years.

