



E.T.S. de Ingeniería
de Caminos, Canales
y Puertos y de
Ingeniería de Minas

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CARTAGENA

E.T.S. de Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos y de
Ingeniería de Minas

SIMULACIÓN DE PROCESOS DE GENERACIÓN DE SULFUROS EN SISTEMAS DE SANEAMIENTO



TRABAJO FIN DE MÁSTER

MÁSTER EN INGENIERÍA DE CAMINOS, CANALES Y PUERTOS

Autor: DAVID RUIZ MARTÍNEZ

Director: JUAN TOMÁS GARCÍA BERMEJO

Simulación de procesos de generación de sulfuros en sistemas de saneamiento

*A mis padres y Marta, por su
apoyo, comprensión y paciencia.*

*A mi director Juan Tomás, por
su dedicación y sabiduría.*

CONTENIDO

1	RESUMEN.....	7
2	INTRODUCCIÓN	9
2.1	PROBLEMÁTICA	9
2.2	GENERACIÓN DEL ÁCIDO SULFHÍDRICO.....	11
3	OBJETIVOS.....	15
3.1	OBJETIVO GENERAL	15
3.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	15
4	MATERIALES Y MÉTODOS	17
4.1	CAMPAÑA DE CAMPO	17
4.2	MODELOS EMPÍRICOS DE GENERACIÓN DE SULFHÍDRICO.....	18
4.2.1	<i>Modelo base: J. S. Matos y E. R. de Sousa (1992)</i>	19
4.2.2	<i>Modelo de A. G. Boon y A. R. Lister (1975)</i>	24
4.2.3	<i>Modelo de S. Elmaleh et al. (1998)</i>	26
4.2.4	<i>Modelo de C. Yongsiri et al. (2004)</i>	28
4.2.5	<i>Modelo de O. Lahav et al. (2004)</i>	33
4.2.6	<i>Modelo de A. H. Nielsen et al. (2005)</i>	37
4.3	MODELO HIDRÁULICO Y PUNTOS DE ESTUDIO	42
4.4	ANÁLISIS DE DATOS	47
5	RESULTADOS	49
5.1	MODELO BASE: J. S. MATOS Y E. R. DE SOUSA (1992)	49
5.1.1	<i>Simulación</i>	49
5.1.2	<i>Análisis estadístico</i>	51
5.1.3	<i>Regresión</i>	54
5.2	MODELO DE A. G. BOON Y A. R. LISTER (1975).....	56
5.2.1	<i>Simulación</i>	56
5.2.2	<i>Análisis estadístico</i>	58
5.2.3	<i>Regresión</i>	61
5.3	MODELO DE S. ELMALEH ET AL. (1998).....	62
5.3.1	<i>Simulación</i>	62
5.3.2	<i>Análisis estadístico</i>	63
5.3.3	<i>Regresión</i>	66
5.4	MODELO DE C. YONGSIRI ET AL. (2004)	68
5.4.1	<i>Simulación</i>	68
5.5	MODELO DE O. LAHAV ET AL. (2004)	70
5.5.1	<i>Simulación</i>	70
5.5.2	<i>Análisis estadístico</i>	71
5.5.3	<i>Regresión</i>	74
5.6	MODELO DE A. H. NIELSEN ET AL. (2005)	76

5.6.1	<i>Simulación</i>	76
5.6.2	<i>Análisis estadístico</i>	77
5.6.3	<i>Regresión</i>	80
5.7	COMPARACIÓN DE MODELOS	82
5.8	ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD	84
6	CONCLUSIONES	87
7	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	89
8	ÍNDICE DE FIGURAS	93
9	ÍNDICE DE TABLAS	97
10	AGRADECIMIENTOS.....	99



1 RESUMEN

Una de las principales cuestiones que preocupa hoy en día en la gestión de redes de saneamiento es la necesidad de control sobre el ácido sulfhídrico, especialmente en conducciones en gravedad. Este gas tóxico e incoloro se genera en el agua residual, principalmente a partir de los sulfatos presentes en la misma y como consecuencia de condiciones anaerobias. Posteriormente escapa del agua residual ocasionando con frecuencia problemas de olor si hay fugas al entorno, problemas de salud a los trabajadores de las instalaciones y problemas de corrosión sobre los materiales de las tuberías, lo que da lugar a una disminución de la vida útil del sistema.

El presente trabajo fin de máster busca conocer el comportamiento del ácido sulfhídrico en las redes de saneamiento, modelizando su concentración en dos puntos de la red de la ciudad de Murcia. Para ello, se presenta una campaña experimental en campo donde se obtienen medidas de sulfuros disueltos en el agua residual, de ácido sulfhídrico en la atmosfera de las conducciones y mediciones de diversas propiedades fisicoquímicas y eléctricas del agua.

Durante la fase de simulación se plantean seis modelos empíricos de generación de sulfhídrico que son ajustados, aplicados y comparados con los datos de la campaña de campo. Estos modelos representan tanto la generación de sulfhídrico dentro del agua residual como la liberación de éste a la fase aérea y su absorción por las paredes de la conducción. Para los datos hidráulicos necesarios durante la simulación, se recurre a un modelo numérico de la red estudiada.

Una vez trabajados los modelos empíricos, se procede a trabajar con modelos estadísticos. Analizándose las variables con influencia en las simulaciones realizadas, mediante correlaciones y técnicas de reducción de variables, para posteriormente proponer una regresión lineal múltiple que busque el cálculo del ácido sulfhídrico en la atmósfera del colector, en cada punto estudiado y para cada modelo aplicado. El trabajo se ha completado con un análisis de sensibilidad del modelo empírico que mejor se ajusta a los datos medidos en campo.

Como resultado, el modelo que mejor se ha comportado ha sido el de J. S. Matos y E. R. de Sousa (1992), logrando en las regresiones lineales múltiples unos coeficientes de determinación de 0.72 y 0.84 en los dos puntos estudiados. El análisis de sensibilidad arroja que ninguna de las variables empleadas es despreciable y todas se deben cuantificar de forma adecuada para que la regresión lineal se aproxime a los valores medidos en campo.



2 INTRODUCCIÓN

2.1 PROBLEMÁTICA

Actualmente, uno de las principales preocupaciones presentes en la gestión de los sistemas de saneamiento es la presencia de ácido sulfhídrico, H_2S , en las conducciones. Este compuesto gaseoso e incoloro es altamente peligroso, según la Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades (ATSDR) del Departamento de Salud y Servicios Humanos de EE. UU., el ser humano es capaz de detectarlo por su característico y desagradable olor a huevos podridos en concentraciones bajas (entre 0.0005 y 0.3 partes por millón o ppm), sin embargo, con altas concentraciones una persona pierde la capacidad de oler esta sustancia, dificultando su detección y pudiendo sufrir pérdidas de conciencia o incluso el paro respiratorio.

Además de los problemas de salud que pueden sufrir los trabajadores de las redes de saneamiento o las frecuentes quejas por malos olores presentes en el entorno del alcantarillado, el ácido sulfhídrico plantea un gran reto para la gestión de las conducciones en gravedad de agua residual, ya que es capaz de degradarlas hasta destruirlas (Figura 1).

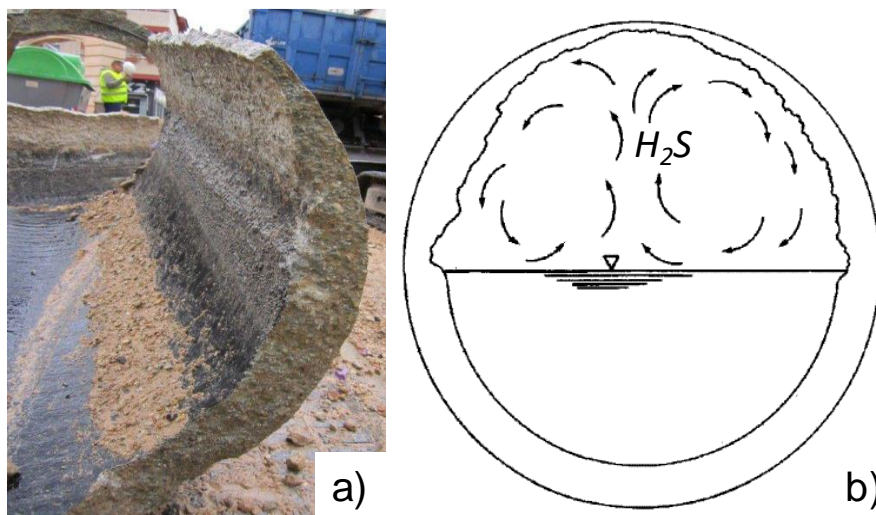


Figura 1. a) Vista de la degradación en colector de Javalí Nuevo, C/Corredera (Murcia). b) Distribución de la corrosión en una conducción (U.S. EPA, 1985).

Este hecho se produce cuando el ácido sulfhídrico presente en la atmósfera de la conducción es absorbido por las paredes emergidas de la misma, donde un grupo de bacterias acidofílicas llamadas bacterias oxidadoras de azufre (del género *Thiobacillus*) lo aprovechan para dar lugar a ácido sulfúrico (H_2SO_4).

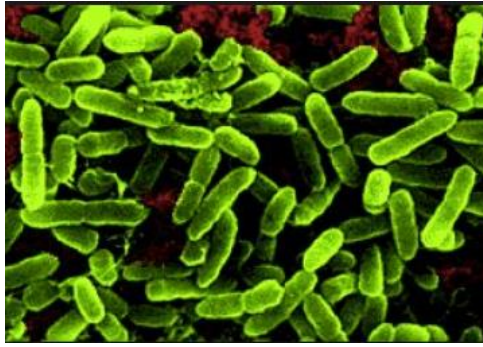
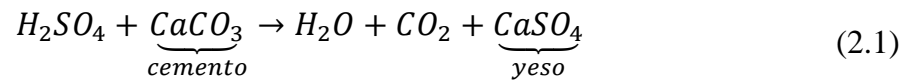


Figura 2. *Thiobacillus Thiooxidans* a través de microscopio electrónico de barrido (microbewiki)

La presencia de ácido sulfúrico acaba neutralizando la alcalinidad de los componentes del hormigón y disminuyendo sus propiedades (Donckels et al., 2014; Sand et al., 1987).



Con el tiempo el espesor de hormigón va disminuyendo y, eventualmente, se produce el colapso de la conducción antes de alcanzar la vida útil esperada, agravándose el problema en el caso de tuberías armadas, al darse, además, corrosión en el metal expuesto.



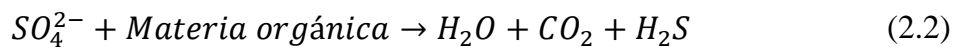
Figura 3. Ejemplos de corrosión en elementos de saneamiento por acción del ácido sulfúrico (Universidad de Queensland; adforensics.wordpress.com)

Este conjunto de problemáticas pone sobre la mesa la importancia de conocer la concentración de sulfhídrico existente en el interior de las redes de saneamiento, así como su control y disminución, para poder gestionar de forma adecuada los sistemas de saneamiento (García et al., 2017^a).



2.2 GENERACIÓN DEL ÁCIDO SULFHÍDRICO

Para dar lugar a los problemas recogidos en el título anterior, el ácido sulfhídrico debe aparecer en la atmósfera del sistema de saneamiento. Su generación se da en las aguas residuales que circulan por la conducción, pudiendo tener dos fuentes diferenciadas: la degradación de materia orgánica que contenga sulfuros o la reducción de sulfatos. La fuente mayoritaria es la reducción de sulfatos (SO_4^{2-}), produciéndose como consecuencia de la falta de oxígeno, concretamente bajo condiciones anaerobias (Nielsen and Hvitved-Jacobsen, 1988), y por bacterias sulfato reductoras (principalmente del género *Desulfovibrio*) retenidas en la capa bacteriana adherida a las paredes sumergidas, también llamada biofilm o biopelícula, o en los sedimentos de la conducción (Hvitved-Jacobsen et al., 2013). La ecuación (2.2) recoge la reducción del sulfato y un sencillo diagrama del proceso se recoge en la Figura 5.



Durante la reducción del sulfato se genera H_2S , y sus formas disociadas HS^- y S^{2-} , que conforman los denominados sulfuros y se encuentran disueltos en el agua residual. Esta disolución presenta un equilibrio según el pH del agua (U.S. EPA, 1985), tal y como se puede apreciar en la Figura 6.

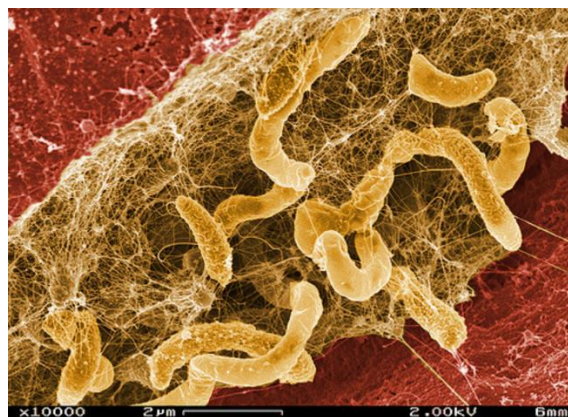


Figura 4. *Desulfovibrio Desulfuricans* a través de microscopio electrónico de barrido (EMSL Analytical)

Si se diese una alta concentración de oxígeno disuelto en el agua residual, los sulfuros serían oxidados en las capas externas del biofilm, dando lugar a un ciclo interno de azufre dentro del biofilm (ASCE, 1989) y no se liberarían a la fase líquida. Sin embargo, ante concentraciones pequeñas de oxígeno disuelto los sulfuros pueden acceder al agua residual. Con niveles de oxígeno superiores a 1 g/m^3 se puede considerar que no existen sulfuros en la fase líquida (Hvitved-Jacobsen et al., 2013).

El ácido sulfhídrico tiene una baja solubilidad en el agua, y debido al efecto de la turbulencia, se libera fácilmente a la atmósfera de las conducciones, donde se produce el conjunto de problemas descritos anteriormente.

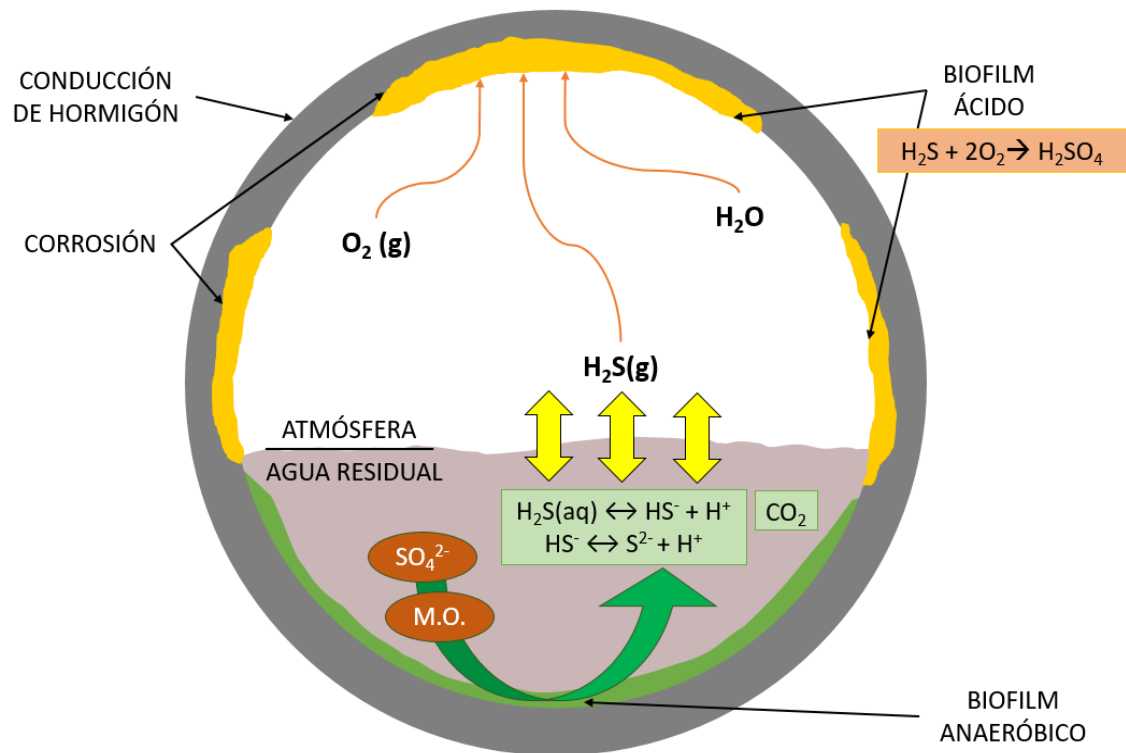


Figura 5. Esquema simplificado del proceso de generación de ácido sulfhídrico y su transformación en ácido sulfúrico. Elaboración propia basada en (Hvitved-Jacobsen et al., 2013) y (U.S. EPA, 1985)

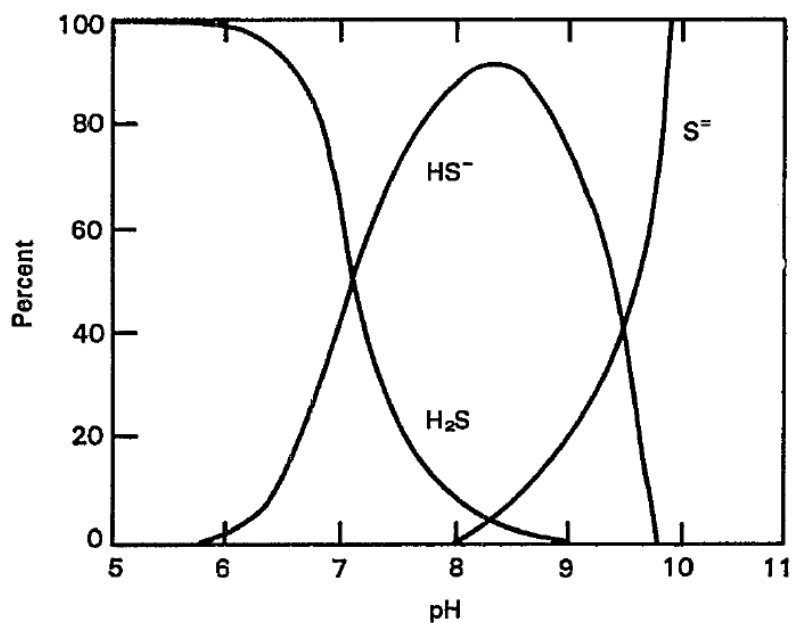


Figura 6. Equilibrio entre sulfuros según el pH (U.S. EPA, 1985).



Para poder modelizar la formación de sulfuros en el agua residual, y ante la complejidad del fenómeno, se debe atender a qué parámetros intervienen en el proceso.

En primer lugar, deben existir condiciones anaerobias y nitrato u otras sustancias inorgánicas oxidadas (Carrera et al., 2016). También un aporte de materia orgánica biodegradable, ya sea expresado a través de la demanda biológica de oxígeno a 5 días (DBO_5) o de la demanda química de oxígeno (DQO), es necesario para tener un alto potencial de generación de sulfuros. Mientras que existiendo concentraciones de sulfato disuelto mayores a 5-15 mgS/L, la producción de sulfuros no queda limitada por este parámetro (Nielsen and Hvitved-Jacobsen, 1988).

La temperatura, tanto de la atmósfera de la conducción como la propia del agua residual, y el pH son clave en la producción de sulfuros al tratarse de un proceso biológico. La temperatura puede aletargar o estimular la comunidad bacteriana y controla la difusión de substrato en el biofilm (Nielsen et al., 1998). Además, un pH entre 5.5 y 9 asegura un crecimiento óptimo de las bacterias sulfato reductoras (Gutierrez et al., 2009).

Por último, queda mencionar las condiciones hidrodinámicas del fluido. Parámetros como el tiempo de retención hidráulica (TRH), caudales transportados, velocidades, perímetro mojado o porcentaje de llenado de la conducción afectan ampliamente a la formación de sulfuros. Por ejemplo, con velocidades reducidas (< 0.8 m/s) el ancho del biofilm puede aumentar (100 – 300 μ m) a la vez que habrá mayor deposición de sedimento (Santry, 1963) y mayor TRH, aumentando la posibilidad de tener condiciones anaerobias. Por otro lado, las variaciones de caudal causan fluctuaciones en la formación de sulfuros a lo largo del día y el porcentaje de llenado de las conducciones puede afectar a la concentración (Carrera et al., 2016).



3 OBJETIVOS

3.1 OBJETIVO GENERAL

Este trabajo fin de máster tiene como objetivo general modelizar la concentración de ácido sulfhídrico en las redes de saneamiento. Para ello se recurre a la aplicación de modelos matemáticos que simulen el fenómeno en el sistema de saneamiento de la ciudad de Murcia, empleando un número de parámetros proporcionado y arrojando resultados compatibles con las medidas obtenidas durante la campaña de campo realizada.

3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Además, para alcanzar el objetivo general se plantean los siguientes objetivos específicos:

- 1) Tratar el comportamiento del ácido sulfhídrico por etapas, simulando primeramente la generación de sulfuros en el agua residual y posteriormente la liberación de ácido sulfhídrico a la atmósfera de las conducciones. De este modo la profundización y el estudio del proceso es mayor.
- 2) Simular de forma puntual y a lo largo del tiempo, con el fin de obtener resultados de niveles de sulfuros y ácido sulfhídrico en continuo en puntos específicos de la red de saneamiento estudiada.
- 3) Realizar un estudio de los modelos matemáticos existentes, eligiendo finalmente aquellos que mejor representen el fenómeno.
- 4) Localizar puntos de estudio adecuados donde aplicar los modelos, caracterizando adecuadamente sus condiciones físicas y químicas e identificando aquella información necesaria para lograr una correcta simulación.
- 5) Alcanzar un conocimiento pleno de los modelos aplicados, dando sentido a cada parámetro y entendiendo cómo adecuarlos a los puntos de estudio para ajustar los resultados obtenidos a las mediciones reales.
- 6) Aplicar ajustes estadísticos a los resultados de los modelos, con los que buscar una expresión para cada punto estudiado que permita predecir la concentración de ácido sulfhídrico en la fase gaseosa de la tubería.
- 7) Realizar un análisis de sensibilidad con el fin de determinar qué variables son especialmente significativas en el proceso.
- 8) Plantear posibles líneas de investigación a las que podría dar pie el desarrollo de este trabajo fin de máster



4 MATERIALES Y MÉTODOS

4.1 CAMPAÑA DE CAMPO

Como elemento previo a la realización del presente trabajo fin de máster, se desarrolló una campaña de toma de muestras en varios puntos de la red de saneamiento de la ciudad de Murcia, en colaboración con la Empresa Municipal de Agua y Saneamiento de Murcia (EMUASA). La campaña tuvo lugar durante los meses de septiembre a noviembre de 2016, y en ella se caracterizaban, para cada punto de muestreo, los sulfuros disueltos en el agua residual mediante kits colorimétricos, propiedades fisicoquímicas del agua residual y los niveles de ácido sulfhídrico existente en la atmósfera de los colectores mediante medidores en continuo.

Durante la caracterización de los sulfuros disueltos se recogían muestras de agua residual, a las cuales se les aplicaba la metodología del azul de metileno: los sulfuros reaccionan con dimetil p-fenilendiamina en presencia de cloruro férrico para producir azul de metileno. Para la aplicación de este método se utilizaron los kits colorimétricos de CHEMetrics® (U.S. EPA, 1979). En la Figura 7a se puede apreciar la tonalidad azul adquirida por una muestra que se compara con un patrón para determinar el total de sulfuros disueltos, a más intensidad de azul más sulfuros disueltos contendrá la muestra. Los resultados se expresan en mg/L de sulfuro. La campaña de muestreo puntual se llevó a cabo siempre en horario de 10:00 a 14:00 horas.

En la zona de medida se dispusieron además dos sondas multiparamétricas HANNA HI 9828 sumergidas en el agua residual, que caracterizan diversas propiedades fisicoquímicas y eléctricas del agua, tales como el oxígeno disuelto en el agua residual (OD), el potencial de oxidación-reducción (ORP), la conductividad eléctrica (EC), la temperatura del agua (T), el grado de acidez o basicidad (pH) y los sólidos totales disueltos (TDS). Como se puede observar en la Figura 7b, las sondas se sumergían en el agua residual que circula por la tubería protegiéndolas con una malla de acero inoxidable que permitía el paso del agua. La medida del oxígeno disuelto inferior a 0.5 mg/L es un indicador de que las condiciones anaerobias empiezan a gobernar las reacciones en el seno del agua residual, en general los valores medidos fueron inferiores a 0.1 mg/L.

En cuanto a la medición de los niveles de ácido sulfhídrico en la atmósfera de las conducciones, se instalaron en pozos de registro cercanos a la zona de medida dos medidores en continuo Odalog modelo LL-H₂S-0-1000 con rango de medida de 0-1000 ppm y con resolución de 1 ppm. Dichos equipos tienen una autonomía en cuanto a su batería de más de 20 días y disponen en su interior de un datalogger que en

función de la periodicidad de los valores registrados alcanza también varios días, el equipo registra además la temperatura en la atmósfera del colector. Para el presente trabajo se registró una medida cada 5 minutos. La Figura 7c muestra el equipo OdaLog para la medición en la atmósfera del colector.

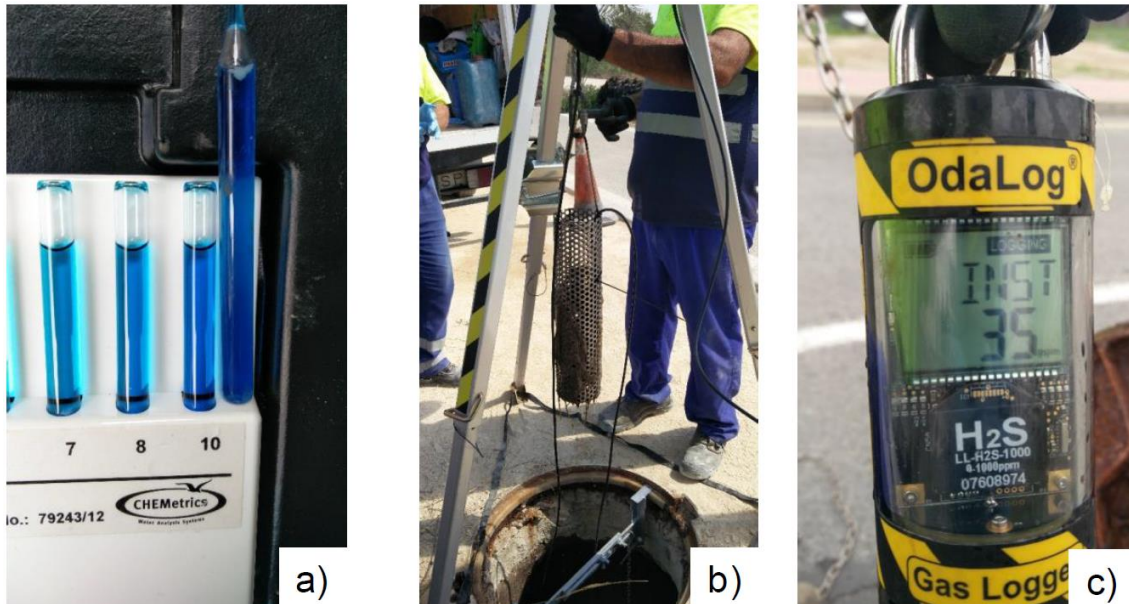


Figura 7. a) Detalle de test colorimétrico de sulfuros en agua residual, muestra coloreada junto a patrón de medición. b) Sonda multiparamétrica protegida y lista para introducir en la red de saneamiento. c) Equipo de medición de ácido sulfhídrico y temperatura en atmósfera de colector.

4.2 MODELOS EMPÍRICOS DE GENERACIÓN DE SULFHÍDRICO

En el objetivo general de este trabajo se recoge que la aplicación de los modelos matemáticos de generación de sulfhídrico debe conllevar el uso de un número adecuado de parámetros, para ello podemos recurrir a modelos empíricos, determinísticos o estocásticos.

Un modelo empírico es aquel que nace del proceso prueba-error derivado de la aplicación de un experimento, pudiendo predecir un fenómeno de causa-efecto bajo ciertas condiciones para las que fue desarrollado o en un entorno similar siendo correctamente recalibrado. De forma general, estos modelos contienen información teórica limitada sobre el fenómeno que representan, a cambio de precisar un número reducido de parámetros (Hvitved-Jacobsen et al., 2013).

Por otro lado, existen modelos de tipo determinístico, los cuales expresan el funcionamiento de un sistema a través de sus procesos físicos, químicos o biológicos, y las interacciones entre ellos, conteniendo una base teórica mucho mayor que los modelos empíricos. Estos modelos son muy precisos y potentes, pero debido a su complejidad, necesitan el conocimiento de una gran cantidad de parámetros y las correspondientes medidas para lograr validar las detalladas calibraciones (Hvitved-



Jacobsen et al., 2013). Dentro de este grupo de modelos estaría el modelo WATS (Wastewater Aerobic/anaerobic Transformations in Sewers), que fue ya planteado en 1998 como explicación a la transformación del carbono orgánico en conducciones en gravedad por medio de un balance de masas (Hvitved-Jacobsen et al., 1998). El modelo WATS ha ido evolucionando y ya incluye procesos aeróbicos, anóxicos y anaeróbicos presentes en el agua residual, biofilms y sedimentos, a la vez que contiene el cálculo de la transformación de los sulfuros y la corrosión relacionada con ellos (Vollertsen et al., 2011).

Finalmente, los modelos estocásticos son aquellos que incorporan un proceso estocástico en su definición, estos procesos poseen algún hecho basado en el azar y, por ello, se definen en variables aleatorias, arrojando resultados probabilísticos (Rincón, 2012).

En el presente trabajo se trabaja con modelos empíricos, con el fin de usar un número de parámetros compatible con las medidas realizadas en la campaña de campo y lograr una aplicabilidad abordable a nuevos puntos de estudio, esperando una aproximación suficiente sin entrar en la complejidad y detalle de los modelos determinísticos o estocásticos. Se parte de un modelo base, asentado en lo expuesto por J. S. Matos y E. R. de Sousa en 1992, para, posteriormente, crear el resto de modelos por medio de la aplicación de distintas ecuaciones análogas, definidas por otros autores, a las empleadas en el modelo base. La simulación de estos modelos se lleva a cabo por formulación de las ecuaciones directamente en una hoja de cálculo.

4.2.1 Modelo base: J. S. Matos y E. R. de Sousa (1992)

El modelo propuesto por Matos y de Sousa en 1992, o modelo base en el presente trabajo, se compone de dos ecuaciones principales acopladas.

$$\frac{d[S]_{aq}}{dt} = \frac{[S]_{generado}}{R_h} - \frac{[S]_{emitido}}{d_m} \quad (4.1)$$

$$\frac{d[S]_{atm}}{dt} = \frac{[S]_{emitido}}{d_m} - [S]_{absorbido} \quad (4.2)$$

La ecuación (4.1) recoge el balance de sulfuros dentro del agua residual, donde la concentración de sulfuros es, generalizando, igual a lo generado menos lo emitido a la fase aérea. Mientras que la segunda ecuación (4.2), recoge el balance de ácido sulfhídrico en la atmósfera de la conducción, entendiéndose también de forma general como lo que se ha emitido desde el agua residual menos lo que se absorbe en las paredes secas del colector.

Los elementos que intervienen en estas dos ecuaciones principales son:

$$[S]_{generado} = M' \cdot EBOD = M' \cdot DBO_5 \cdot 1.07^{T-20} \quad (4.3)$$

$$[S]_{emitido} = m \cdot [S]_{aq} \cdot C_A \cdot (s \cdot u)^{\frac{3}{8}} \cdot (1 - q) \quad (4.4)$$

$$[S]_{absorbido} = \frac{D_H \cdot C_H \cdot (1 - f_p)}{T_c} \quad (4.5)$$

La ecuación de generación está basada en la propuesta por R. D. Pomeroy (Pomeroy and Parkhurst, 1978). Otras ecuaciones utilizadas son (Matos and de Sousa, 1992):

$$C_A = \frac{1 + 0.17u^2}{g \cdot d_m} \quad (4.6)$$

$$q = \left[\frac{C_H}{C_{eq}} \right] \quad (4.7)$$

$$C_{eq} = (3.79 \cdot 10^{-5} \cdot T^2 + 7.64 \cdot 10^{-3} \cdot T + 0.197) \cdot [S]_{aq} \quad (4.8)$$

$$T_c = \frac{32.8 \cdot v_{air}}{u_{air} \cdot f^{0.5}} \quad (4.9)$$

Y la descripción de cada elemento es:

- $[S]_{aq}$ = sulfuros disueltos en el agua residual simulados (mg/L).
- $[S]_{generado}$ = sulfuros generados en el perímetro mojado de biofilm $\left(\frac{g/m^2}{h}\right)$.
- $[S]_{emitido}$ = sulfhídrico emitido desde el agua residual a la atmósfera del colector a través de la superficie del agua $\left(\frac{g/m^2}{h}\right)$.
- Rh = radio hidráulico de la conducción (m).
- dm = calado medio del agua: $\frac{\text{Superficie mojada}}{\text{Ancho en la superficie libre del agua}}$ (m).
- $[S]_{atm}$ = sulfhídrico existente simulado en la atmósfera del colector (g/h).
- $[S]_{absorbido}$ = sulfhídrico absorbidos por el perímetro seco de la conducción $\left(\frac{g/m^2}{h}\right)$.
- $V_{líquido}$ = volumen de agua residual (m³)
- P_{seco} = perímetro seco o emergido (m).
- M' = coeficiente del flujo de generación de sulfuros debido al biofilm (m/h) que adopta valores constantes comprendidos en el rango de $[0.32 - 1] \cdot 10^{-3}$ (Hvitved-Jacobsen et al., 2013; U.S. EPA, 1985).
- $EBOD$ = demanda biológica de carbono efectiva en función de la temperatura del agua.
- T = temperatura del agua (°C).



- m = coeficiente empírico de pérdida de sulfuros por salida a la atmósfera, adopta valores, de más a menos conservativo, de 0.64 a 0.96.
- C_A = factor de turbulencia (adim.)
- s = pendiente de la línea de energía en (m/m).
- u = velocidad media del agua (m/s).
- g = aceleración de la gravedad (m/s²).
- q = saturación relativa de H₂S en el aire (C_H) respecto a la concentración de equilibrio (C_{eq}), adopta un valor entre un 2 y un 20 % expresado en fracción decimal.
- D_H = difusividad del ácido sulfhídrico a través del biofilm, se asume constante con valor de $58 \cdot 10^{-3}$ m²/h.
- f_p = grado de colmatación del biofilm que rodea al perímetro seco de la conducción.
- T_c = espesor del biofilm sobre perímetro seco de conducción (m).
- ν_{air} = viscosidad cinemática del aire = $1.5 \cdot 10^{-5}$ m²/s.
- u_{air} = velocidad media del aire $\approx 0.65 \cdot u$ (m/s).
- f = coeficiente de Darcy-Weisbach teniendo en cuenta la rugosidad debida a los sedimentos y al transporte de éstos por el fondo, se obtiene por medio de la ecuación de Swamee-Jain suponiendo una rugosidad absoluta (e) de 8 mm. Otros parámetros necesarios son el número de Reynolds (R_e) y diámetro (D).

$$f_{Swamee-Jain} = \frac{0.25}{\left[\log_{10} \left(\frac{e}{3.7D} + \frac{5.74}{R_e^{0.9}} \right) \right]^2} \quad (4.10)$$

De este modo se pueden formar al completo las ecuaciones principales descritas en (4.1) y (4.2).

$$\frac{d[S]_{aq}}{dt} = \frac{M' \cdot DBO_5 \cdot 1.07^{T-20}}{R_h} - \frac{m \cdot [S]_{aq} \cdot C_A \cdot (s \cdot u)^{\frac{3}{8}} \cdot (1 - q)}{d_m} \quad (4.11)$$

$$\frac{d[S]_{atm}}{dt} = \frac{m \cdot [S]_{aq} \cdot C_A \cdot (s \cdot u)^{\frac{3}{8}} \cdot (1 - q)}{d_m} \cdot V_{liquido} - \frac{D_H \cdot C_H \cdot (1 - f_p)}{T_c} \cdot P_{seco} \quad (4.12)$$

Estas ecuaciones se van a estudiar en referencia a un metro de longitud de tubería, y a lo largo del tiempo en intervalos de 5 minutos ($\Delta t = 5/60$ horas). De este modo, la ecuación (4.11) se expresa en mg/L/h mientras que (4.12) viene definida en g/h, que posteriormente se transformará a ppm de ácido sulfhídrico en atmósfera. Para la simulación temporal se procede a desarrollar las ecuaciones por diferencias finitas para despejar el valor de sulfuros disueltos y sulfhídrico en atmósfera del intervalo de tiempo siguiente, $[S]_{aq_{t+1}}$ y $[S]_{atm_{t+1}}$ respectivamente.

Balance en el agua residual:

$$\frac{d[S]_{aq}}{dt} \left(\frac{mg/L}{h} \right) = \underbrace{\frac{M'EBOD}{R_h}}_{\text{Generación}} - \underbrace{\frac{m \cdot [S]_{aq} \cdot C_A \cdot (s \cdot u)^{\frac{3}{8}} \cdot (1-q)}{d_m}}_{\text{Emisión}} \quad (4.13)$$

En diferencias finitas:

$$\frac{S_{aq_{t+1}} - S_{aq_t}}{\Delta t} = \frac{1}{2} \left[\left(\frac{M'EBOD}{R_h} \right)_t + \left(\frac{M'EBOD}{R_h} \right)_{t+1} \right] - \frac{1}{2} \left[\left(\frac{m \cdot [S]_{aq} \cdot C_A \cdot (s \cdot u)^{\frac{3}{8}} \cdot (1-q)}{d_m} \right)_t + \left(\frac{m \cdot [S]_{aq} \cdot C_A \cdot (s \cdot u)^{\frac{3}{8}} \cdot (1-q)}{d_m} \right)_{t+1} \right] \quad (4.14)$$

$$S_{aq_{t+1}} = S_{aq_t} + \Delta t \left\{ \frac{1}{2} \left[\left(\frac{M'EBOD}{R_h} \right)_t + \left(\frac{M'EBOD}{R_h} \right)_{t+1} \right] - \frac{1}{2} \left(\frac{m \cdot [S]_{aq} \cdot C_A \cdot (s \cdot u)^{\frac{3}{8}} \cdot (1-q)}{d_m} \right)_t - \frac{1}{2} \left(\frac{m \cdot [S]_{aq} \cdot C_A \cdot (s \cdot u)^{\frac{3}{8}} \cdot (1-q)}{d_m} \right)_{t+1} \right\} \quad (4.15)$$

$$S_{aq_{t+1}} = S_{aq_t} - \frac{\Delta t}{2} \left(\frac{m \cdot [S]_{aq} \cdot C_A \cdot (s \cdot u)^{\frac{3}{8}} \cdot (1-q)}{d_m} \right)_{t+1} + \Delta t \left\{ \frac{1}{2} \left[\left(\frac{M'EBOD}{R_h} \right)_t + \left(\frac{M'EBOD}{R_h} \right)_{t+1} \right] - \frac{1}{2} \left(\frac{m \cdot [S]_{aq} \cdot C_A \cdot (s \cdot u)^{\frac{3}{8}} \cdot (1-q)}{d_m} \right)_t \right\} \quad (4.16)$$

$$S_{aq_{t+1}} \left(1 + \frac{\Delta t}{2} \left(\frac{m \cdot [S]_{aq} \cdot C_A \cdot (s \cdot u)^{\frac{3}{8}} \cdot (1-q)}{d_m} \right)_{t+1} \right) = S_{aq_t} + \Delta t \left\{ \frac{1}{2} \left[\left(\frac{M'EBOD}{R_h} \right)_t + \left(\frac{M'EBOD}{R_h} \right)_{t+1} \right] - \frac{1}{2} \left(\frac{m \cdot [S]_{aq} \cdot C_A \cdot (s \cdot u)^{\frac{3}{8}} \cdot (1-q)}{d_m} \right)_t \right\} \quad (4.17)$$

$$S_{aq_{t+1}} (mg/L) = \frac{S_{aq_t} + \Delta t \left\{ \frac{1}{2} \left[\left(\frac{M'EBOD}{R_h} \right)_t + \left(\frac{M'EBOD}{R_h} \right)_{t+1} \right] - \frac{1}{2} \left(\frac{m \cdot [S]_{aq} \cdot C_A \cdot (s \cdot u)^{\frac{3}{8}} \cdot (1-q)}{d_m} \right)_t \right\}}{1 + \frac{\Delta t}{2} \left(\frac{m \cdot [S]_{aq} \cdot C_A \cdot (s \cdot u)^{\frac{3}{8}} \cdot (1-q)}{d_m} \right)_{t+1}} \quad (4.18)$$

Balance en la atm del colector:

Al tratar un tramo de tubería de un metro de longitud el volumen de agua residual se ve transformado en el área mojada.

$$V_{\text{líquido}} \rightarrow \{1 \text{ metro de longitud}\} \rightarrow A_{\text{mojada}} \quad (4.19)$$

Quedando:

$$\frac{d[S]_{\text{atm}}}{dt} \left(\frac{g}{h}\right) = \underbrace{\frac{m \cdot [S]_{\text{aq}} \cdot C_A \cdot (s \cdot u)^{\frac{3}{8}} \cdot (1 - q)}{d_m} \cdot A_{\text{mojada}}}_{\text{Emisión}} - \underbrace{\frac{D_H \cdot C_H \cdot (1 - f_p)}{T_c} \cdot P_{\text{seco}}}_{\text{Absorción en pared}} \quad (4.20)$$

En diferencias finitas:

$$\frac{[S]_{\text{atm}_{t+1}} - [S]_{\text{atm}_t}}{\Delta t} = \frac{\left(\frac{m \cdot [S]_{\text{aq}} \cdot C_A \cdot (s \cdot u)^{\frac{3}{8}} \cdot (1 - q)}{d_m} \cdot A_{\text{mojada}}\right)_t + \left(\frac{m \cdot [S]_{\text{aq}} \cdot C_A \cdot (s \cdot u)^{\frac{3}{8}} \cdot (1 - q)}{d_m} \cdot A_{\text{mojada}}\right)_{t+1}}{2} - \frac{\left(\frac{D_H \cdot C_H \cdot (1 - f_p)}{T_c} \cdot P_{\text{seco}}\right)_t + \left(\frac{D_H \cdot C_H \cdot (1 - f_p)}{T_c} \cdot P_{\text{seco}}\right)_{t+1}}{2} \quad (4.21)$$

$$[S]_{\text{atm}_{t+1}}(g) = [S]_{\text{atm}_t} + \frac{\Delta t}{2} \cdot \left[\begin{aligned} &\left(\frac{m \cdot [S]_{\text{aq}} \cdot C_A \cdot (s \cdot u)^{\frac{3}{8}} \cdot (1 - q)}{d_m} \cdot A_{\text{mojada}}\right)_t + \left(\frac{m \cdot [S]_{\text{aq}} \cdot C_A \cdot (s \cdot u)^{\frac{3}{8}} \cdot (1 - q)}{d_m} \cdot A_{\text{mojada}}\right)_{t+1} \\ &- \left(\frac{D_H \cdot C_H \cdot (1 - f_p)}{T_c} \cdot P_{\text{seco}}\right)_t + \left(\frac{D_H \cdot C_H \cdot (1 - f_p)}{T_c} \cdot P_{\text{seco}}\right)_{t+1} \end{aligned} \right] \quad (4.22)$$



4.2.2 Modelo de A. G. Boon y A. R. Lister (1975)

Este modelo emplea la ecuación de generación propuesta por Boon y Lister en 1975, la cual se asemeja al concepto de la ecuación de Pomeroy presente en el modelo de Matos y de Sousa, salvo que recurre a la DQO para expresar la carga orgánica del agua residual en lugar de usar la DBO₅.

El modelo es igual al base pero alterando la parte de generación, dónde se emplea la ecuación (4.23):

$$[S]_{generado} = Cte \cdot DQO_t \cdot 1.07^{T-20} \quad (4.23)$$

Donde los parámetros empleados son (Boon and Lister, 1975):

- $[S]_{generado}$ = sulfuros generados en el perímetro mojado de biofilm $\left(\frac{g/m^2}{h}\right)$.
- $Cte = 0.023 \cdot 10^{-3}$ (m/h).
- DQO_t = demanda química de oxígeno total (mg/L).
- T = temperatura del agua (°C).

Al variar sólo la ecuación de generación, las ecuaciones de emisión y absorción quedan iguales, y el desarrollo en diferencias finitas se recoge en las páginas siguientes.

Balance en el agua residual:

$$\frac{d[S]_{aq}}{dt} \left(\frac{mg/L}{h} \right) = \underbrace{Cte \cdot DQO_t \cdot 1.07^{T-20}}_{\text{Generación}} - \underbrace{\frac{m \cdot [S]_{aq} \cdot C_A \cdot (s \cdot u)^{\frac{3}{8}} \cdot (1-q)}{d_m}}_{\text{Emisión}} \quad (4.24)$$

En diferencias finitas:

$$\frac{S_{aq_{t+1}} - S_{aq_t}}{\Delta t} = \frac{1}{2} [(Cte \cdot DQO_t \cdot 1.07^{T-20})_t + (Cte \cdot DQO_t \cdot 1.07^{T-20})_{t+1}] - \frac{1}{2} \left[\left(\frac{m \cdot [S]_{aq} \cdot C_A \cdot (s \cdot u)^{\frac{3}{8}} \cdot (1-q)}{d_m} \right)_t + \left(\frac{m \cdot [S]_{aq} \cdot C_A \cdot (s \cdot u)^{\frac{3}{8}} \cdot (1-q)}{d_m} \right)_{t+1} \right] \quad (4.25)$$

$$S_{aq_{t+1}} = S_{aq_t} - \frac{\Delta t}{2} \left(\frac{m \cdot [S]_{aq} \cdot C_A \cdot (s \cdot u)^{\frac{3}{8}} \cdot (1-q)}{d_m} \right)_{t+1} + \Delta t \left\{ \frac{1}{2} [(Cte \cdot DQO_t \cdot 1.07^{T-20})_t + (Cte \cdot DQO_t \cdot 1.07^{T-20})_{t+1}] - \frac{1}{2} \left(\frac{m \cdot [S]_{aq} \cdot C_A \cdot (s \cdot u)^{\frac{3}{8}} \cdot (1-q)}{d_m} \right)_t \right\} \quad (4.26)$$

$$S_{aq_{t+1}} \left(1 + \frac{\Delta t}{2} \left(\frac{m \cdot [S]_{aq} \cdot C_A \cdot (s \cdot u)^{\frac{3}{8}} \cdot (1-q)}{d_m} \right)_{t+1} \right) \quad (4.27)$$

$$= S_{aq_t} + \Delta t \left\{ \frac{1}{2} [(Cte \cdot DQO_t \cdot 1.07^{T-20})_t + (Cte \cdot DQO_t \cdot 1.07^{T-20})_{t+1}] - \frac{1}{2} \left(\frac{m \cdot [S]_{aq} \cdot C_A \cdot (s \cdot u)^{\frac{3}{8}} \cdot (1-q)}{d_m} \right)_t \right\}$$

$$S_{aq_{t+1}} (mg/L) = \frac{S_{aq_t} + \Delta t \left\{ \frac{1}{2} [(Cte \cdot DQO_t \cdot 1.07^{T-20})_t + (Cte \cdot DQO_t \cdot 1.07^{T-20})_{t+1}] - \frac{1}{2} \left(\frac{m \cdot [S]_{aq} \cdot C_A \cdot (s \cdot u)^{\frac{3}{8}} \cdot (1-q)}{d_m} \right)_t \right\}}{1 + \frac{\Delta t}{2} \left(\frac{m \cdot [S]_{aq} \cdot C_A \cdot (s \cdot u)^{\frac{3}{8}} \cdot (1-q)}{d_m} \right)_{t+1}} \quad (4.28)$$

Balance en la atmósfera del colector en diferencias finitas: queda como la ecuación (4.22) tras el mismo proceso



4.2.3 Modelo de S. Elmaleh et al. (1998)

S. Elmaleh et al. estudiaron, en 1998, una instalación de 61 kilómetros de longitud que transportaba por gravedad y a sección completa agua urbana reciclada. El objetivo fue encontrar una ecuación que reflejase la producción de ácido sulfhídrico en dicha conducción. Esta ecuación, al igual que el modelo de Boon y Lister, toma la DQO como expresión de carga orgánica del agua residual, estando en este caso el parámetro corregido por un exponente.

En este modelo se propone usar la ecuación desarrollada en el estudio de S. Elmaleh et al. para simular la producción de sulfhídrico en el agua residual, aun sabiendo que será necesario aportar algún ajuste, ya que el agua residual posee más carga orgánica que el agua urbana reciclada.

Por lo tanto, se plantea el modelo empírico tomando el modelo base y sustituyendo la ecuación de generación por la propuesta:

$$[S]_{generado} = Cte \cdot DQO_t^{1.9} \cdot 1.07^{T-20} \quad (4.29)$$

Donde se tiene que (Elmaleh et al., 1998):

- $[S]_{generado}$ = sulfuros generados en el perímetro mojado de biofilm $\left(\frac{g/m^2}{h}\right)$.
- $Cte = 0.0052 \cdot 10^{-3}$ (m/h).
- DQO_t = demanda química de oxígeno total (mg/L).
- T = temperatura del agua (°C).

En este caso también las ecuaciones de emisión y absorción quedan iguales, y el desarrollo en diferencias finitas se recoge a continuación.

Balance en el agua residual:

$$\frac{d[S]_{aq}}{dt} \left(\frac{mg/L}{h} \right) = \underbrace{Cte \cdot DQO_t^{1.9} \cdot 1.07^{T-20}}_{\text{Generación}} - \underbrace{\frac{m \cdot [S]_{aq} \cdot C_A \cdot (s \cdot u)^{\frac{3}{8}} \cdot (1-q)}{d_m}}_{\text{Emisión}} \quad (4.30)$$

En diferencias finitas:

$$\frac{S_{aq_{t+1}} - S_{aq_t}}{\Delta t} = \frac{1}{2} [(Cte \cdot DQO_t^{1.9} \cdot 1.07^{T-20})_t + (Cte \cdot DQO_t^{1.9} \cdot 1.07^{T-20})_{t+1}] - \frac{1}{2} \left[\left(\frac{m \cdot [S]_{aq} \cdot C_A \cdot (s \cdot u)^{\frac{3}{8}} \cdot (1-q)}{d_m} \right)_t + \left(\frac{m \cdot [S]_{aq} \cdot C_A \cdot (s \cdot u)^{\frac{3}{8}} \cdot (1-q)}{d_m} \right)_{t+1} \right] \quad (4.31)$$

$$S_{aq_{t+1}} = S_{aq_t} - \frac{\Delta t}{2} \left(\frac{m \cdot [S]_{aq} \cdot C_A \cdot (s \cdot u)^{\frac{3}{8}} \cdot (1-q)}{d_m} \right)_{t+1} + \Delta t \left\{ \frac{1}{2} [(Cte \cdot DQO_t^{1.9} \cdot 1.07^{T-20})_t + (Cte \cdot DQO_t^{1.9} \cdot 1.07^{T-20})_{t+1}] - \frac{1}{2} \left(\frac{m \cdot [S]_{aq} \cdot C_A \cdot (s \cdot u)^{\frac{3}{8}} \cdot (1-q)}{d_m} \right)_t \right\} \quad (4.32)$$

$$S_{aq_{t+1}} \left(1 + \frac{\Delta t}{2} \left(\frac{m \cdot [S]_{aq} \cdot C_A \cdot (s \cdot u)^{\frac{3}{8}} \cdot (1-q)}{d_m} \right)_{t+1} \right) = S_{aq_t} + \Delta t \left\{ \frac{1}{2} [(Cte \cdot DQO_t^{1.9} \cdot 1.07^{T-20})_t + (Cte \cdot DQO_t^{1.9} \cdot 1.07^{T-20})_{t+1}] - \frac{1}{2} \left(\frac{m \cdot [S]_{aq} \cdot C_A \cdot (s \cdot u)^{\frac{3}{8}} \cdot (1-q)}{d_m} \right)_t \right\} \quad (4.33)$$

$$S_{aq_{t+1}} (mg/L) = \frac{S_{aq_t} + \Delta t \left\{ \frac{1}{2} [(Cte \cdot DQO_t^{1.9} \cdot 1.07^{T-20})_t + (Cte \cdot DQO_t^{1.9} \cdot 1.07^{T-20})_{t+1}] - \frac{1}{2} \left(\frac{m \cdot [S]_{aq} \cdot C_A \cdot (s \cdot u)^{\frac{3}{8}} \cdot (1-q)}{d_m} \right)_t \right\}}{1 + \frac{\Delta t}{2} \left(\frac{m \cdot [S]_{aq} \cdot C_A \cdot (s \cdot u)^{\frac{3}{8}} \cdot (1-q)}{d_m} \right)_{t+1}} \quad (4.34)$$

Balance en la atmósfera del colector en diferencias finitas: queda como la ecuación (4.22) tras el mismo proceso



4.2.4 Modelo de C. Yongsiri et al. (2004)

C. Yongsiri y otros autores plantearon en 2004 un modelo de emisiones de ácido sulfhídrico en tuberías de gravedad, con dos fases (líquida y aérea) y ecuaciones de generación y emisión, entre otras (Yongsiri et al., 2004).

Tasa de generación:

$$Rf \left(\frac{gS}{m^3 \cdot h} \right) = 0.001(COD_s - 50)^{0.5} \cdot 1.03^{(T-20)} \cdot \frac{A}{V_w} \cdot \frac{K_o}{K_o + S_o} \quad (4.35)$$

Donde:

- COD_s = DQO soluble (mg/L)
- $\frac{A}{V_w}$ = área biofilm entre volumen de agua, equivalente a expresar perímetro mojado entre área mojada (m^{-1})
- S_o = oxígeno disuelto en el agua residual (mg/L). Se considerará nulo.
- K_o = concentración de saturación para el oxígeno disuelto (mg/L), al tomar S_o nulo este parámetro no tiene afección.
- T = temperatura ($^{\circ}C$)

Tasa de emisión:

$$Re \left(\frac{gS}{m^3 \cdot h} \right) = f' \cdot \alpha \cdot K_L a_{H_2S} \cdot \left(C_w - \frac{C_A}{f' \cdot H_c} \right) \cdot \theta_e^{(T-20)} \quad (4.36)$$

Donde:

- f' = ratio de $H_2S(aq)$ respecto al sulfuro total, de Yongsiri et al. (2005) se puede extraer que:

$$f' = \frac{[H_2S_{aq}]}{[H_2S_{aq}] + [HS^-]} = \frac{1}{1 + 10^{pH-pKa}} \quad (4.37)$$

Donde pH se supone 7 y pKa toma el mismo valor (Yongsiri et al., 2004).

- α = ratio de $K_L a_{H_2S}$ para agua residual doméstica respecto al agua limpia (0.6)
- $K_L a_{H_2S}$ = coeficiente de transferencia para H_2S (h^{-1}), según Yongsiri et al. (2002) se puede obtener a partir del coeficiente de transferencia para el O_2 :

$$K_L a_{H_2S} = (1.736 - 0.196 pH) \cdot K_L a_{O_2} \quad \text{con } 4.5 \leq pH \leq 8 \quad (4.38)$$

$$K_L a_{O_2} = 0.86 \cdot (1 + 0.2F^2)(s \cdot u)^{\frac{3}{8}} \cdot \frac{\alpha_r^{(T-20)}}{dm} \quad (4.39)$$



Especificando que:

- u = velocidad media del flujo (m/s).
- s = pendiente (m/m).
- dm = calado medio, área mojada/ancho de lámina de agua (m).
- F = número de Froude = $u \cdot (g \cdot dm)^{-0.5}$, donde g es la aceleración de la gravedad (m/s^2).
- T = temperatura ($^{\circ}C$).
- α_r = coeficiente de temperatura para reaireación = 1.024.
- C_w = concentración de sulfuro disuelto ($gS\ m^{-3}$).
- C_A = concentración de H_2S en la fase aérea ($gS\ m^{-3}$).
- H_c = constante de la Ley de Henry para H_2S . (m^3 de fase acuosa/ m^3 de fase aérea, se tomará 0.3616).
- θ_e = factor corrector de temperatura para emisión de H_2S (1.034).
- T = temperatura ($^{\circ}C$).

En las siguientes páginas se presenta el desarrollo en diferencias finitas.

Balance en agua residual por metro de longitud:

$$\frac{dC_w}{dt} \left(\frac{mg/L}{h} \right) = \underbrace{0.001(COD_s - 50)^{0.5} \cdot 1.03^{(T-20)} \cdot \frac{A}{V_w} \cdot \frac{K_o}{K_o + S_o}}_{\text{Generación}} - \underbrace{f' \cdot \alpha \cdot K_L a_{H_2S} \cdot \left(C_w - \frac{C_A}{f' \cdot H_c} \right) \cdot \theta_e^{(T-20)}}_{\text{Emisión}} \quad (4.40)$$

En diferencias finitas:

$$\begin{aligned} \frac{C_{w_{t+1}} - C_{w_t}}{\Delta t} = & \frac{1}{2} \left[\left(0.001(COD_s - 50)^{0.5} \cdot 1.03^{(T-20)} \cdot \frac{A}{V_w} \cdot \frac{K_o}{K_o + S_o} \right)_t + \left(0.001(COD_s - 50)^{0.5} \cdot 1.03^{(T-20)} \cdot \frac{A}{V_w} \cdot \frac{K_o}{K_o + S_o} \right)_{t+1} \right] \\ & - \frac{1}{2} \left[\left(f' \cdot \alpha \cdot K_L a_{H_2S} \cdot \theta_e^{(T-20)} \cdot \left(C_w - \frac{C_A}{f' \cdot H_c} \right) \right)_t + \left(f' \cdot \alpha \cdot K_L a_{H_2S} \cdot \theta_e^{(T-20)} \cdot \left(C_w - \frac{C_A}{f' \cdot H_c} \right) \right)_{t+1} \right] \end{aligned} \quad (4.41)$$

Para simplificar las ecuaciones se toma que:

$$X = f' \cdot \alpha \cdot K_L a_{H_2S} \cdot \theta_e^{(T-20)} \quad (4.42)$$

$$\text{Generación} = 0.001(COD_s - 50)^{0.5} \cdot 1.03^{(T-20)} \cdot \frac{A}{V_w} \cdot \frac{K_o}{K_o + S_o} \quad (4.43)$$

Quedando:

$$\frac{C_{w_{t+1}} - C_{w_t}}{\Delta t} = \frac{1}{2} \left[(\text{Generación})_t + (\text{Generación})_{t+1} - \frac{1}{2} \left[\left(X \cdot \left(C_w - \frac{C_A}{f' \cdot H_c} \right) \right)_t + \left(X \cdot \left(C_w - \frac{C_A}{f' \cdot H_c} \right) \right)_{t+1} \right] \right] \quad (4.44)$$

$$C_{w_{t+1}} = C_{w_t} + \Delta t \left\{ \frac{1}{2} [(\text{Generación})_t + (\text{Generación})_{t+1}] - \frac{1}{2} \left[\left(X \cdot \left(C_w - \frac{C_A}{f' \cdot H_c} \right) \right)_t + \left(X \cdot C_w - X \cdot \frac{C_A}{f' \cdot H_c} \right)_{t+1} \right] \right\} \quad (4.45)$$

$$Cw_{t+1} = Cw_t + \Delta t \left\{ \frac{1}{2} [(Generación)_t + (Generación)_{t+1}] - \frac{1}{2} \left(X \cdot \left(C_w - \frac{C_A}{f' \cdot H_c} \right) \right)_t - \frac{1}{2} (X \cdot C_w)_{t+1} + \frac{1}{2} \left(X \cdot \frac{C_A}{f' \cdot H_c} \right)_{t+1} \right\} \quad (4.46)$$

$$Cw_{t+1} = Cw_t - \frac{\Delta t}{2} (X \cdot C_w)_{t+1} + \Delta t \left\{ \frac{1}{2} [(Generación)_t + (Generación)_{t+1}] - \frac{1}{2} \left(X \cdot \left(C_w - \frac{C_A}{f' \cdot H_c} \right) \right)_t + \frac{1}{2} \left(X \cdot \frac{C_A}{f' \cdot H_c} \right)_{t+1} \right\} \quad (4.47)$$

$$Cw_{t+1} \left(1 + \frac{\Delta t}{2} (X)_{t+1} \right) = Cw_t + \Delta t \left\{ \frac{1}{2} [(Generación)_t + (Generación)_{t+1}] - \frac{1}{2} \left(X \cdot \left(C_w - \frac{C_A}{f' \cdot H_c} \right) \right)_t + \frac{1}{2} \left(X \cdot \frac{C_A}{f' \cdot H_c} \right)_{t+1} \right\} \quad (4.48)$$

$$Cw_{t+1} = \frac{Cw_t + \Delta t \left\{ \frac{1}{2} [(Generación)_t + (Generación)_{t+1}] - \frac{1}{2} \left[X \cdot \left(C_w - \frac{C_A}{f' \cdot H_c} \right) \right]_t + \frac{1}{2} \left[X \cdot \frac{C_A}{f' \cdot H_c} \right]_{t+1} \right\}}{\left(1 + \frac{\Delta t}{2} (X)_{t+1} \right)} \quad (4.49)$$

Finalmente:

$$Cw_{t+1} \left(\frac{mg}{L} \right) = \frac{Cw_t + \Delta t \left\{ \frac{1}{2} [(Generación)_t + (Generación)_{t+1}] - \frac{1}{2} \left[X \cdot \left(C_w - \frac{C_A}{f' \cdot H_c} \right) \right]_t + \frac{1}{2} \left[X \cdot \frac{C_A}{f' \cdot H_c} \right]_{t+1} \right\}}{\left(1 + \frac{\Delta t}{2} (X)_{t+1} \right)} \quad (4.50)$$



Balance en la atmósfera del colector por metro de longitud.

$$\frac{d[S]_{atm}}{dt} \left(\frac{g}{h} \right) = \underbrace{f' \cdot \alpha \cdot K_L a_{H_2S} \cdot \left(C_w - \frac{C_A}{f' \cdot H_c} \right) \cdot \theta_e^{(T-20)} \cdot A_{mojada}}_{\text{Emisión}} - \underbrace{\frac{D_H \cdot C_H \cdot (1 - f_p)}{T_c} \cdot P_{seco}}_{\text{Absorción en pared}} \quad (4.51)$$

En diferencias finitas:

$$\frac{[S]_{atm_{t+1}} - [S]_{atm_t}}{\Delta t} = \frac{\left(f' \cdot \alpha \cdot K_L a_{H_2S} \cdot \left(C_w - \frac{C_A}{f' \cdot H_c} \right) \cdot \theta_e^{(T-20)} \cdot A_{mojada} \right)_t + \left(f' \cdot \alpha \cdot K_L a_{H_2S} \cdot \left(C_w - \frac{C_A}{f' \cdot H_c} \right) \cdot \theta_e^{(T-20)} \cdot A_{mojada} \right)_{t+1}}{2} - \frac{\left(\frac{D_H \cdot C_H (1 - f_p)}{T_c} \cdot P_{seco} \right)_t + \left(\frac{D_H \cdot C_H (1 - f_p)}{T_c} \cdot P_{seco} \right)_{t+1}}{2} \quad (4.52)$$

$$[S]_{atm_{t+1}}(g) = [S]_{atm_t} + \frac{\Delta t}{2} \cdot \left[\begin{aligned} & \left(f' \cdot \alpha \cdot K_L a_{H_2S} \cdot \left(C_w - \frac{C_A}{f' \cdot H_c} \right) \cdot \theta_e^{(T-20)} \cdot A_{mojada} \right)_t + \left(f' \cdot \alpha \cdot K_L a_{H_2S} \cdot \left(C_w - \frac{C_A}{f' \cdot H_c} \right) \cdot \theta_e^{(T-20)} \cdot A_{mojada} \right)_{t+1} \\ & - \left(\frac{D_H \cdot C_H (1 - f_p)}{T_c} \cdot P_{seco} \right)_t + \left(\frac{D_H \cdot C_H (1 - f_p)}{T_c} \cdot P_{seco} \right)_{t+1} \end{aligned} \right] \quad (4.53)$$



4.2.5 Modelo de O. Lahav et al. (2004)

Los autores de este modelo plantearon en su artículo (Lahav et al., 2004) una aproximación semiempírica por mínimos cuadrados de las emisiones de ácido sulfhídrico logradas en tests de laboratorio, usando un equipo de floculación para proporcionar distintos grados de turbulencia a los experimentos. Tras la regresión el coeficiente de determinación obtenido fue de $R^2 = 0.988$.

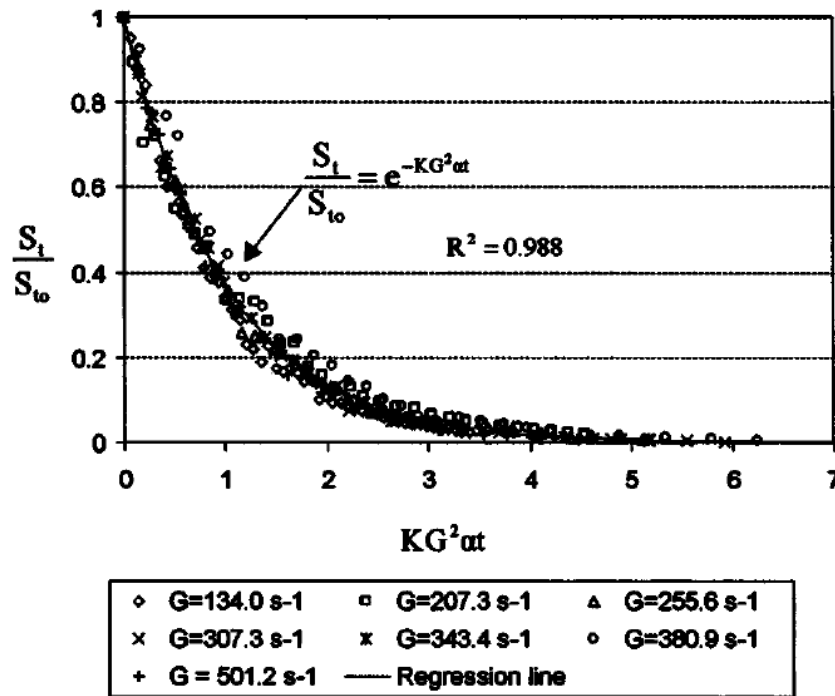


Figura 8. Ajuste empleado por O. Lahav et al. (Lahav et al., 2004)

La fórmula propuesta es:

$$Tasa\ de\ emisión = -\frac{d[S_T]}{dt} = KG^2 \cdot S_T \cdot \frac{A_s}{V} \cdot \frac{1}{1 + \frac{K_{S1}}{10^{-pH}} + \frac{K_{S1}K_{S2}}{10^{-2pH}}} \quad (4.54)$$

La cual se simplifica por medio de:

$$\frac{A_s}{V} \cdot \frac{1}{1 + \frac{K_{S1}}{10^{-pH}} + \frac{K_{S1}K_{S2}}{10^{-2pH}}} \cong \frac{A_s}{2V} \quad (4.55)$$

Además, en la ecuación (4.54) el tiempo está definida en segundos, mientras que el intervalo temporal utilizado en este trabajo es expresado en horas, por lo que finalmente la emisión queda:

$$-\frac{d[S_T]}{dt} \left(\frac{mg}{L \cdot h} \right) = 3600 \cdot KG^2 \cdot S_T \cdot \frac{A_s}{2V} \quad (4.56)$$

Este modelo parte de sustituir en el modelo base la ecuación de emisión a la atmósfera del colector (4.4) por la ecuación (4.56), la cual queda definida por:

- A_s = superficie del líquido expuesta a la fase gaseosa (m^2)
- S_T = concentración de sulfuro en el agua residual (mg/L)
- V = volumen de líquido (m^3), al trabajar por metro de conducción es equivalente al área mojada (m^2).
- G = gradiente de velocidad media = $\left(\gamma \cdot S \cdot \frac{V}{\mu}\right)^{0.5}$, representa las condiciones de mezcla o turbulencia.
 - γ = peso específico del agua (10^4 N/m^3)
 - V = velocidad (m/s)
 - S = pendiente de la conducción
 - μ = viscosidad dinámica ($10^{-3} \text{ N s m}^{-2}$ a 20°C)
- K = constante ($4 \cdot 10^{-9} \text{ m/s}$).

A continuación, se puede encontrar el desarrollo en diferencias finitas del modelo.

Balance en el agua residual por metro de conducción:

$$\frac{d[S_T]}{dt} \left(\frac{mg/L}{h} \right) = \underbrace{\frac{M'EBOD}{R}}_{\text{Generación}} - \underbrace{3600 \cdot KG^2 \cdot S_T \cdot \frac{A_s}{2V}}_{\text{Emisión a atmósfera}} \quad (4.57)$$

En diferencias finitas:

$$\frac{S_{T_{t+1}} - S_{T_t}}{\Delta t} = \frac{1}{2} \left[\left(\frac{M'EBOD}{R} \right)_t + \left(\frac{M'EBOD}{R} \right)_{t+1} \right] - \frac{1}{2} \left[\left(3600 \cdot KG^2 \cdot S_T \cdot \frac{A_s}{2V} \right)_t + \left(3600 \cdot KG^2 \cdot S_T \cdot \frac{A_s}{2V} \right)_{t+1} \right] \quad (4.58)$$

$$S_{T_{t+1}} = S_{T_t} + \Delta t \left\{ \frac{1}{2} \left[\left(\frac{M'EBOD}{R} \right)_t + \left(\frac{M'EBOD}{R} \right)_{t+1} \right] - \frac{1}{2} \left(3600 \cdot KG^2 \cdot S_T \cdot \frac{A_s}{2V} \right)_t - \frac{1}{2} \left(3600 \cdot KG^2 \cdot S_T \cdot \frac{A_s}{2V} \right)_{t+1} \right\} \quad (4.59)$$

$$S_{T_{t+1}} = S_{T_t} - \frac{\Delta t}{2} \left(3600 \cdot KG^2 \cdot S_T \cdot \frac{A_s}{2V} \right)_{t+1} + \Delta t \left\{ \frac{1}{2} \left[\left(\frac{M'EBOD}{R} \right)_t + \left(\frac{M'EBOD}{R} \right)_{t+1} \right] - \frac{1}{2} \left(3600 \cdot KG^2 \cdot S_T \cdot \frac{A_s}{2V} \right)_t \right\} \quad (4.60)$$

$$S_{T_{t+1}} \left(1 + \frac{\Delta t}{2} \left(3600 \cdot KG^2 \cdot \frac{A_s}{2V} \right)_{t+1} \right) = S_{T_t} + \Delta t \left\{ \frac{1}{2} \left[\left(\frac{M'EBOD}{R} \right)_t + \left(\frac{M'EBOD}{R} \right)_{t+1} \right] - \frac{1}{2} \left(3600 \cdot KG^2 \cdot S_T \cdot \frac{A_s}{2V} \right)_t \right\} \quad (4.61)$$

Quedando:

$$S_{T_{t+1}} = \frac{S_{T_t} + \Delta t \left\{ \frac{1}{2} \left[\left(\frac{M'EBOD}{R} \right)_t + \left(\frac{M'EBOD}{R} \right)_{t+1} \right] - \frac{1}{2} \left(3600 \cdot KG^2 \cdot S_T \cdot \frac{A_s}{2V} \right)_t \right\}}{\left(1 + \frac{\Delta t}{2} \left(3600 \cdot KG^2 \cdot \frac{A_s}{2V} \right)_{t+1} \right)} \quad (4.62)$$



Balance en la atmósfera del colector por metro de conducción:

$$\frac{d[S_{atm}]}{dt} \left(\frac{g}{h}\right) = 32065 \cdot KG^2 \cdot S_T \cdot \frac{A_s}{2V} \cdot A_{mojada} - \frac{D_H \cdot C_H(1 - f_p)}{T_c} \cdot P_{seco} \quad (4.63)$$

En diferencias finitas:

$$\frac{[S]_{atm_{t+1}} - [S]_{atm_t}}{\Delta t} = \frac{\left(32065 \cdot KG^2 \cdot S_T \cdot \frac{A_s}{2V} \cdot A_{mojada}\right)_t + \left(32065 \cdot KG^2 \cdot S_T \cdot \frac{A_s}{2V} \cdot A_{mojada}\right)_{t+1}}{2} - \frac{\left(\frac{D_H \cdot C_H(1 - f_p)}{T_c} \cdot P_{seco}\right)_t + \left(\frac{D_H \cdot C_H(1 - f_p)}{T_c} \cdot P_{seco}\right)_{t+1}}{2} \quad (4.64)$$

$$[S]_{atm_{t+1}}(g) = [S]_{atm_t} + \frac{\Delta t}{2} \cdot \left[\begin{aligned} &\left(32065 \cdot KG^2 \cdot S_T \cdot \frac{A_s}{2V} \cdot A_{mojada}\right)_t + \left(32065 \cdot KG^2 \cdot S_T \cdot \frac{A_s}{2V} \cdot A_{mojada}\right)_{t+1} \\ &- \left(\frac{D_H \cdot C_H(1 - f_p)}{T_c} \cdot P_{seco}\right)_t + \left(\frac{D_H \cdot C_H(1 - f_p)}{T_c} \cdot P_{seco}\right)_{t+1} \end{aligned} \right] \quad (4.65)$$



4.2.6 Modelo de A. H. Nielsen et al. (2005)

Los autores del modelo que nos ocupa en este apartado realizaron un estudio donde plantean una extensión del modelo WATS, proponiendo distintas ecuaciones para cada uno de los procesos que componen el ciclo del azufre en un sistema de saneamiento (Nielsen et al., 2005).

El modelo aquí descrito se crea añadiendo las ecuaciones de generación y emisión propuestas en el estudio mencionado al modelo base de este trabajo.

Tasa de generación:

$$Rf \left(\frac{gS}{m^3 \cdot h} \right) = k_{S(-II),p} (S_F + S_A + X_{S1})^{0.5} \cdot \frac{K_o}{S_o + K_o} \frac{A}{V} 1.03^{(T-20^\circ C)} \quad (4.66)$$

Donde:

- $k_{S(-II),p}$ = constante para la producción de sulfuro ($gS (gCOD)^{-0.5} m^{-2} h^{-1}$)
De acuerdo a Nielsen et al. (2008), se toman valores de 0.001 a 0.01.
- S_F, S_A y X_{S1} : substrato fermentable, productos de la fermentación y substrato rápidamente hidrolizable respectivamente en mg/L. Según Hvitved-Jacobsen et al. (2013), la suma de estos tres parámetros puede tomarse como el 20% de la DQO total (Figura 9).

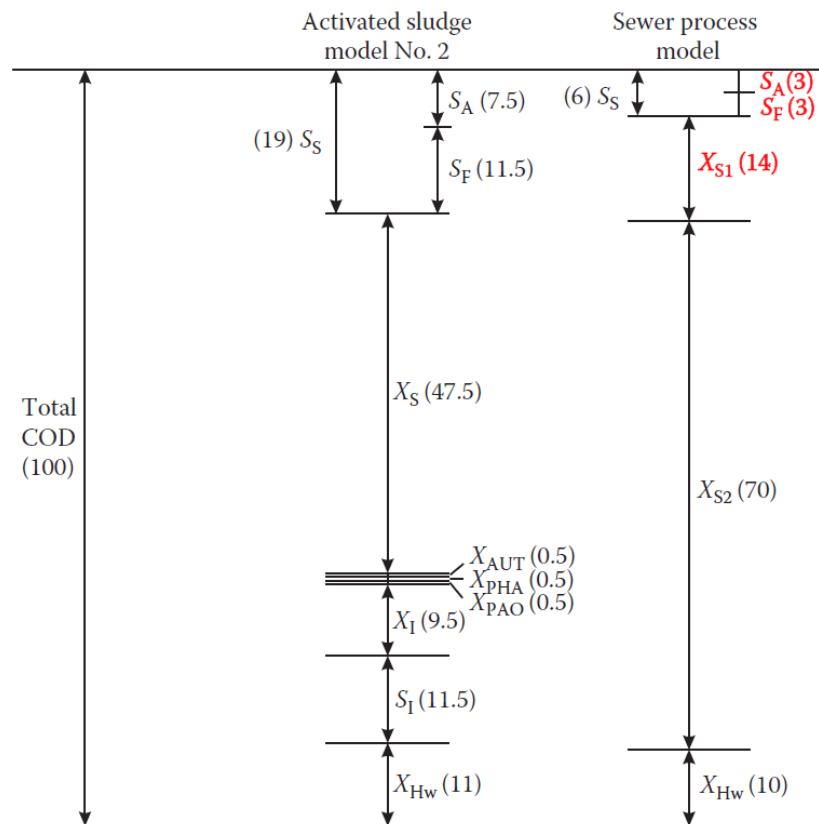


Figura 9. Comparación de fracciones de DQO para la simulación de fangos activados y de procesos en sistemas de saneamiento (Hvitved-Jacobsen et al., 2013).

- $\frac{A}{V}$ = área de biofilm entre volumen de agua, equivalente a expresar perímetro mojado entre área mojada (m^{-1})
- S_O = oxígeno disuelto en el agua residual (mg/L). Se considerará nulo.
- K_O = saturación de concentración para el oxígeno disuelto (mg/L), al tomar S_O nulo este parámetro no tiene afección.
- T = temperatura ($^{\circ}C$)

Tasa de emisión:

$$\begin{aligned} Re \left(\frac{gS}{m^3 \cdot h} \right) &= k_L a_{S(-II)} \cdot 24 \cdot (\gamma \cdot S_{S(-II)} - S_{S(-II),eq}) \\ &= k_L a_{S(-II)} \cdot 24 \cdot \gamma \cdot \left(S_{S(-II)} - \frac{S_{S(-II),eq}}{\gamma} \right) \end{aligned} \quad (4.67)$$

Donde:

- $k_L a_{S(-II)}$: coeficiente de transferencia aire-agua para H_2S (h^{-1}), equivalente a la constante $K_L a_{H_2S}$ del modelo de C. Yongsiri et al. definida por las ecuaciones (4.38) y (4.39).
- $S_{S(-II),eq}$: concentración de sulfuro disuelto en equilibrio con la concentración de la fase gaseosa (mg/L). Para su obtención se recurre a la expresión de C_{eq} usada por Matos y de Sousa en el modelo base, ecuación (4.8), ya que C_{eq} nos ofrece los mg/L de sulfhídrico en fase aérea en equilibrio con el disuelto en el agua.

Por ello, partiendo de la concentración en la atmósfera del colector en un instante dado se puede plantear que:

$$[S]_{atm} \left(\frac{mg}{L} \right) = \frac{[S]_{atm} (g)}{\text{Área seca}} \quad (4.68)$$

$$S_{S(-II),eq} \left(\frac{mg}{L} \right) = \frac{[S]_{atm} \left(\frac{mg}{L} \right)}{(0.0000379 \cdot T^2 + 0.00764 \cdot T + 0.197)} \quad (4.69)$$

- γ : ratio de $H_2S(aq)$ respecto al sulfuro total, es igual al parámetro f' del modelo de C. Yongsiri et al. recogido en la ecuación (4.37).

En las siguientes páginas se desarrolla el modelo en diferencias finitas.

Balance en el agua residual por metro de longitud.

$$\frac{dS_{S(-II)}}{dt} \left(\frac{mg/L}{h} \right) = \underbrace{k_{S(-II),p} (S_F + S_A + X_{S1})^{0.5} \frac{K_o}{S_o + K_o} \frac{A}{V} 1.03^{(T-20^\circ C)}}_{\text{Generación}} - \underbrace{k_L a_{S(-II)} \cdot 24 \cdot \gamma \cdot \left(S_{S(-II)} - \frac{S_{S(-II),eq}}{\gamma} \right)}_{\text{Emisión}} \quad (4.70)$$

En diferencias finitas:

$$\begin{aligned} \frac{S_{S(-II)_{t+1}} - S_{S(-II)_t}}{\Delta t} &= \frac{1}{2} [(Generación)_t + (Generación)_{t+1}] \\ &- \frac{1}{2} \left[\left(k_L a_{S(-II)} \cdot 24 \cdot (\gamma \cdot S_{S(-II)} - S_{S(-II),eq}) \right)_t + \left(k_L a_{S(-II)} \cdot 24 \cdot (\gamma \cdot S_{S(-II)} - S_{S(-II),eq}) \right)_{t+1} \right] \end{aligned} \quad (4.71)$$

Para simplificar se aplica que:

$$Z = k_L a_{S(-II)} \cdot 24 \cdot \gamma \quad (4.72)$$

Quedando:

$$\frac{S_{S(-II)_{t+1}} - S_{S(-II)_t}}{\Delta t} = \frac{1}{2} [(Generación)_t + (Generación)_{t+1}] - \frac{1}{2} \left[\left(Z \cdot \left(S_{S(-II)} - \frac{S_{S(-II),eq}}{\gamma} \right) \right)_t + \left(Z \cdot \left(S_{S(-II)} - \frac{S_{S(-II),eq}}{\gamma} \right) \right)_{t+1} \right] \quad (4.73)$$

$$S_{S(-II)_{t+1}} = S_{S(-II)_t} + \Delta t \left\{ \frac{1}{2} [(Generación)_t + (Generación)_{t+1}] - \frac{1}{2} \left[\left(Z \cdot \left(S_{S(-II)} - \frac{S_{S(-II),eq}}{\gamma} \right) \right)_t + \left(Z \cdot S_{S(-II)} - Z \cdot \frac{S_{S(-II),eq}}{\gamma} \right)_{t+1} \right] \right\} \quad (4.74)$$



$$S_{S(-II)_{t+1}} = S_{S(-II)_t} + \Delta t \left\{ \frac{1}{2} [(Generación)_t + (Generación)_{t+1}] - \frac{1}{2} \left(Z \cdot \left(S_{S(-II)} - \frac{S_{S(-II),eq}}{\gamma} \right) \right)_t - \frac{1}{2} (Z \cdot S_{S(-II)})_{t+1} + \frac{1}{2} \left(Z \cdot \frac{S_{S(-II),eq}}{\gamma} \right)_{t+1} \right\} \quad (4.75)$$

$$S_{S(-II)_{t+1}} = S_{S(-II)_t} - \frac{\Delta t}{2} (Z \cdot S_{S(-II)})_{t+1} + \Delta t \left\{ \frac{1}{2} [(Generación)_t + (Generación)_{t+1}] - \frac{1}{2} \left(Z \cdot \left(S_{S(-II)} - \frac{S_{S(-II),eq}}{\gamma} \right) \right)_t + \frac{1}{2} \left(Z \cdot \frac{S_{S(-II),eq}}{\gamma} \right)_{t+1} \right\} \quad (4.76)$$

$$S_{S(-II)_{t+1}} \left(1 + \frac{\Delta t}{2} (Z)_{t+1} \right) = S_{S(-II)_t} + \Delta t \left\{ \frac{1}{2} [(Generación)_t + (Generación)_{t+1}] - \frac{1}{2} \left(Z \cdot \left(S_{S(-II)} - \frac{S_{S(-II),eq}}{\gamma} \right) \right)_t + \frac{1}{2} \left(Z \cdot \frac{S_{S(-II),eq}}{\gamma} \right)_{t+1} \right\} \quad (4.77)$$

Y finalmente:

$$S_{S(-II)_{t+1}} = \frac{S_{S(-II)_t} + \Delta t \left\{ \frac{1}{2} [(Generación)_t + (Generación)_{t+1}] - \frac{1}{2} \left(Z \cdot \left(S_{S(-II)} - \frac{S_{S(-II),eq}}{\gamma} \right) \right)_t + \frac{1}{2} \left(Z \cdot \frac{S_{S(-II),eq}}{\gamma} \right)_{t+1} \right\}}{\left(1 + \frac{\Delta t}{2} (Z)_{t+1} \right)} \quad (4.78)$$

Balance en la atmósfera del colector por metro de longitud.

$$\frac{d[S]_{atm}}{dt} \left(\frac{g}{h} \right) = \underbrace{fk_L a_{S(-II)} \cdot 24 \cdot \gamma \cdot \left(S_{S(-II)} - \frac{S_{S(-II),eq}}{\gamma} \right) \cdot A_{mojada}}_{\text{Emisión}} - \underbrace{\frac{D_H \cdot C_H \cdot (1 - f_p)}{T_c} \cdot P_{seco}}_{\text{Absorción en pared}} \quad (4.79)$$

En diferencias finitas:

$$\frac{[S]_{atm_{t+1}} - [S]_{atm_t}}{\Delta t} = \frac{\left(k_L a_{S(-II)} \cdot 24 \cdot \gamma \cdot \left(S_{S(-II)} - \frac{S_{S(-II),eq}}{\gamma} \right) \cdot A_{mojada} \right)_t + \left(k_L a_{S(-II)} \cdot 24 \cdot \gamma \cdot \left(S_{S(-II)} - \frac{S_{S(-II),eq}}{\gamma} \right) \cdot A_{mojada} \right)_{t+1}}{2} - \frac{\left(\frac{D_H \cdot C_H (1 - f_p)}{T_c} \cdot P_{seco} \right)_t + \left(\frac{D_H \cdot C_H (1 - f_p)}{T_c} \cdot P_{seco} \right)_{t+1}}{2} \quad (4.80)$$

$$[S]_{atm_{t+1}}(g) = [S]_{atm_t} + \frac{\Delta t}{2} \cdot \left[\begin{aligned} & \left(k_L a_{S(-II)} \cdot 24 \cdot \gamma \cdot \left(S_{S(-II)} - \frac{S_{S(-II),eq}}{\gamma} \right) \cdot A_{mojada} \right)_t + \left(k_L a_{S(-II)} \cdot 24 \cdot \gamma \cdot \left(S_{S(-II)} - \frac{S_{S(-II),eq}}{\gamma} \right) \cdot A_{mojada} \right)_{t+1} \\ & - \left(\frac{D_H \cdot C_H (1 - f_p)}{T_c} \cdot P_{seco} \right)_t + \left(\frac{D_H \cdot C_H (1 - f_p)}{T_c} \cdot P_{seco} \right)_{t+1} \end{aligned} \right] \quad (4.81)$$



4.3 MODELO HIDRÁULICO Y PUNTOS DE ESTUDIO

El municipio de Murcia, situado en el sudeste español, cuenta con un sistema de saneamiento unitario (ya que aguas residuales y aguas pluviales se transportan conjuntamente) de 1597 km de longitud aproximada. Se trata de una red que se encuentra ubicada en el valle aluvial del río Segura, donde éste confluye con el otro gran curso de agua de la Región de Murcia: el río Guadalentín (también Sangonera o Reguerón en su parte final). Esta unión de cauces ha provocado en la zona la existencia de una orografía con pendientes bajas y nivel freático alto, que hace necesario disponer de más de 180 elevaciones de aguas residuales para el correcto drenaje del sistema hacia las Estaciones Depuradoras de Aguas Residuales (E.D.A.R.).

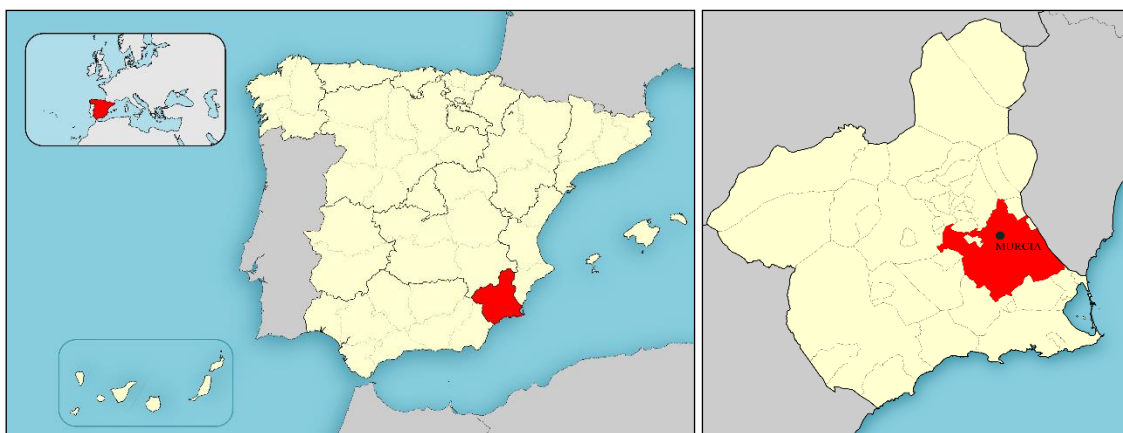


Figura 10. Situación del municipio de Murcia (editado de Wikimedia Commons)

Cabe destacar las siguientes características y magnitudes de la red de saneamiento del municipio de Murcia:

- Longitud de red de alcantarillado: 1.597 Km, mayoritariamente unitaria (98%)
- Diámetros de la red comprendidos entre 200 y 2.800 mm, cuyo material predominante es el hormigón.
- Acometidas de saneamiento existentes (domiciliarias, industriales y otras): 72.753 unidades.
- Pozos de registro de alcantarillado: 48.387 unidades.
- Imbornales y sumideros: 37.598 unidades, repartidos por Murcia ciudad (36%) y pedanías (64%)
- Estaciones de bombeo de aguas residuales y pluviales: 186
- Tanques de tormenta: 9 instalaciones existentes
- EDAR: 14
- Redes por sistema por vacío: 2

La empresa Municipal de Agua y Saneamiento de Murcia (EMUASA) es la operadora y gestora de dicha red, apoyándose para ello en un modelo hidráulico calibrado, cuya



geometría se muestra en la Figura 11. Este modelo permite simular las características del flujo de agua residual a lo largo del tiempo y para diversos caudales, tanto en tiempo seco como durante un episodio de lluvia (García et al., 2017b).

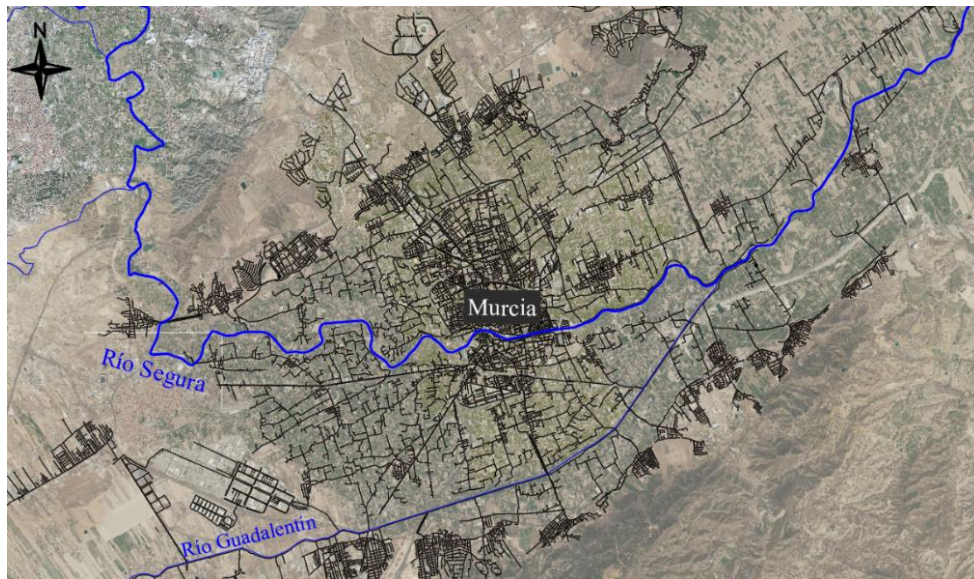


Figura 11. Geometría del modelo de red de saneamiento del municipio de Murcia

Los puntos elegidos para realizar el estudio se denominan Zarandona y La Venta, ambos situados en la zona oriental de la ciudad de Murcia. El punto Zarandona está localizado en la zona media de la red de saneamiento, mientras que La Venta se encuentra en el final de la misma, muy próximo a la descarga del sistema a la E.D.A.R. de Murcia Este. Una vista de la localización de ambos puntos puede apreciarse en la Figura 12.

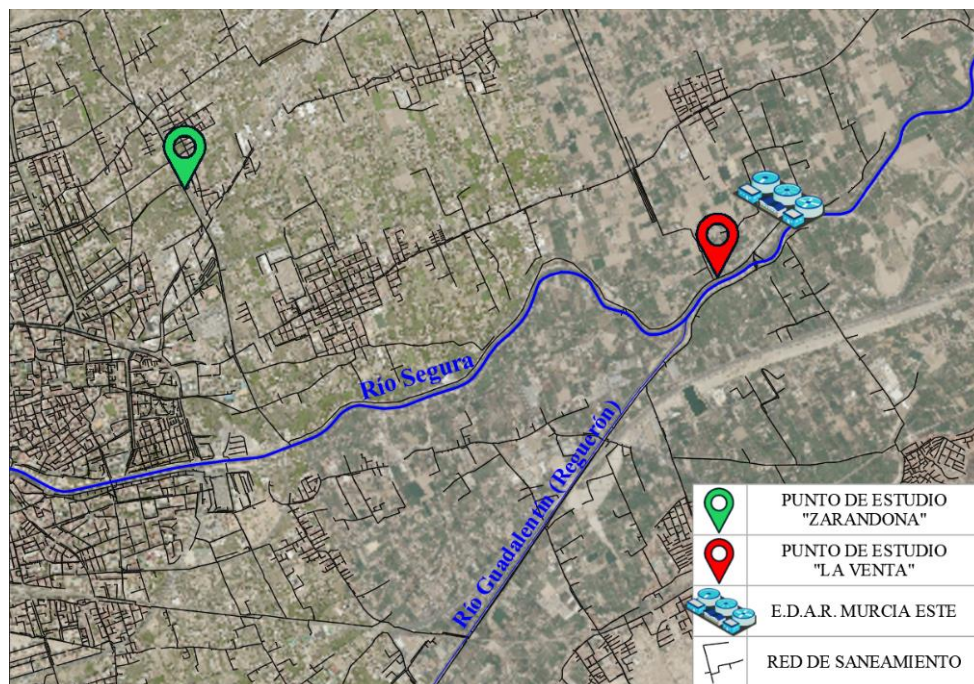


Figura 12. Localización de los puntos empleados en el estudio

Zarandona es un punto localizado en una conducción en túnel de dovelas de hormigón armado con un diámetro de 2.80 m y pendiente aproximada de 0.002 m/m, mientras que La Venta se encuentra sobre el denominado colector margen izquierda, junto al cauce del río Segura, y cuenta con 2 m de diámetro y la misma pendiente aproximada.

Para la aplicación de los modelos empíricos se precisa de conocer cierta información relevante en los puntos de estudio, como es el caso del caudal circulante en tiempo seco, obtenido por medio de la simulación del modelo hidráulico. Esta simulación se lleva a cabo mediante el software de la agencia de protección ambiental estadounidense (USEPA) Storm Water Management Model (SWMM) en su versión 5.1. El software mencionado trabaja con distintos módulos o capas que representan los fenómenos hidrológicos e hidráulicos incluidos en la evacuación y drenaje de las precipitaciones de una zona (módulo de atmosférico, de superficie del suelo, de transporte y de aguas subterráneas), por ello se trata de un modelo dinámico que permite simular tanto cantidad como calidad del agua evacuada para un evento único o en continuo (Espín Leal, 2016; U.S. EPA, 2015).

Este trabajo realiza un estudio en tiempo seco, como es obvio, ya que se localiza en una zona donde los eventos de lluvia suelen ser escasos y torrenciales dando lugar a efectos de lavado y tiempos de retención hidráulicos reducidos.

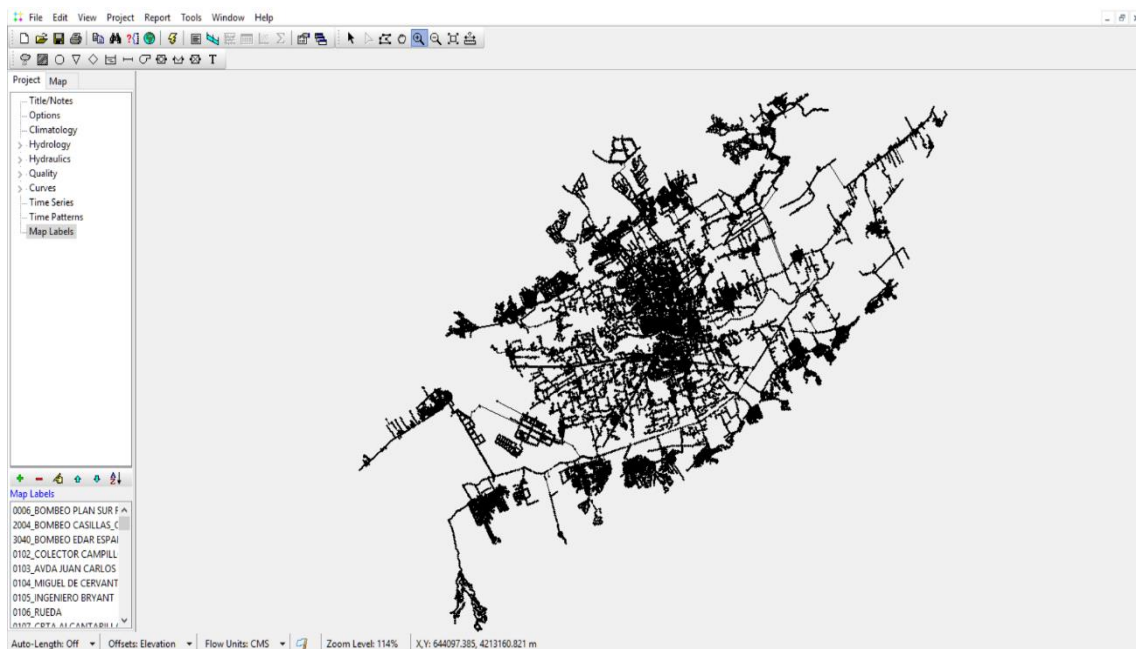


Figura 13. Interfaz de EPA SWMM 5.1 con modelo hidráulico del estudio.



También se obtienen curvas medias diarias de TRH, temperatura de agua en el colector, DBO₅ y DQO soluble, obtenidas de acuerdo a mediciones y diversos trabajos (Espín Leal, 2016).

Las curvas de DBO₅, DQOs y temperatura del agua del colector se toman comunes para los dos puntos, ya que se trata de curvas que representan valores medios de la zona (Figura 14). El TRH de La Venta resulta de añadirle dos horas al obtenido en Zarandona. Del modelo hidráulico, además de los caudales en tiempo seco, también se extraen los calados asociados a dichos caudales para cada punto.

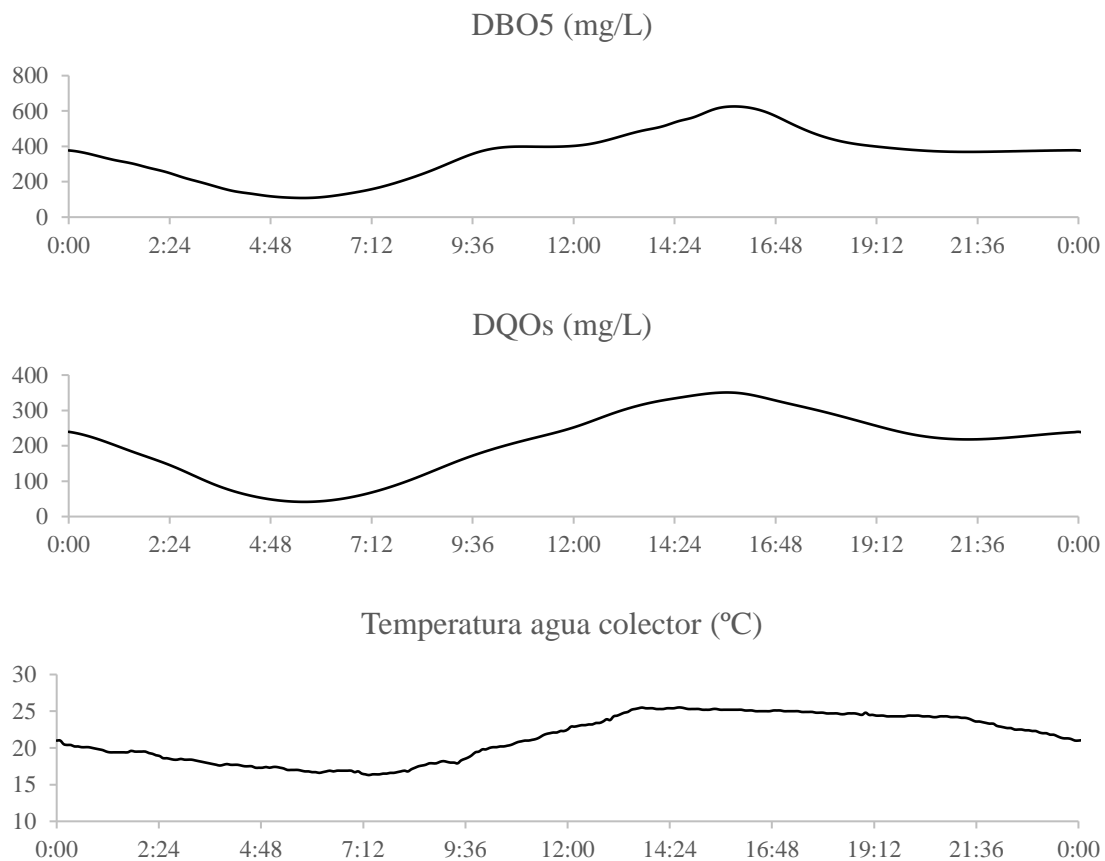


Figura 14. Curvas medias diarias comunes a La Venta y Zarandona.

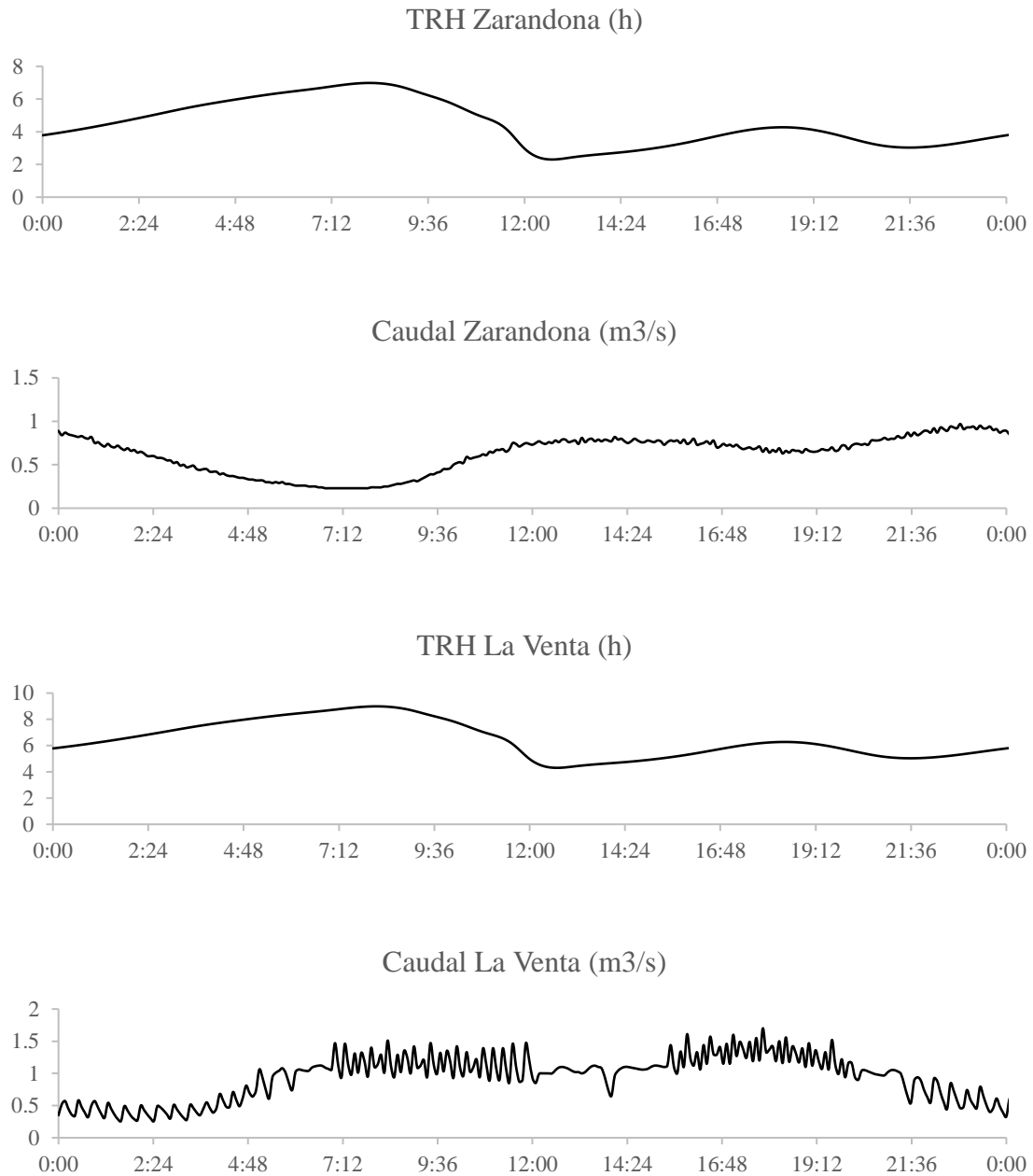


Figura 15. Curvas particularizadas a cada punto de estudio

Tanto las curvas de la Figura 14 como las de la Figura 15, también serán empleadas para la realización del ajuste estadístico de los resultados obtenidos tras la aplicación de los modelos empíricos.



4.4 ANÁLISIS DE DATOS

Para el análisis y procesamiento de los datos provenientes de la simulación de los modelos (realizada en hojas de cálculo) se recurre al software estadístico SPSS® Statistics v.23, de la empresa tecnológica IBM® (Figura 16).

Dicho software genera análisis estadísticos y gestiona información, produciendo desde gráficos o estadísticos descriptivos hasta otros estudios más complejos. Además, permite analizar dependencias o interdependencias, comportamientos futuros, etc. Su principal campo de aplicación es el análisis multivariante de datos experimentales (Medina-Moral, 2005).

	Tadm	Tagua	Caudal	Calado	Velocidad	Vol	TRH	DQO	Saq	Satm	Ssuav	fp	var	var	var
1	26,00	24,60	1,00	,49	1,68	,19	4,46	768,34	2,99	14,02	41,27	,95			
2	26,10	24,80	1,02	,50	1,66	,20	4,48	769,56	3,05	14,42	40,67	,95			
3	26,10	24,90	1,07	,51	1,69	,20	4,51	771,05	3,10	14,72	40,23	,95			
4	26,10	25,20	1,11	,52	1,71	,21	4,53	772,87	3,16	14,90	39,71	,95			
5	26,10	25,30	1,12	,52	1,73	,21	4,55	775,09	3,22	14,91	39,27	,95			
6	26,10	25,40	1,10	,52	1,69	,21	4,57	777,78	3,28	14,99	38,81	,95			
7	26,10	25,50	1,08	,51	1,71	,20	4,59	780,97	3,35	15,05	38,53	,95			
8	26,00	25,40	,94	,48	1,62	,18	4,61	784,72	3,40	15,13	38,67	,95			
9	26,00	25,40	,75	,43	1,51	,16	4,63	789,06	3,45	15,37	38,89	,96			
10	26,00	25,40	,65	,40	1,45	,14	4,65	794,03	3,49	16,23	38,90	,95			
11	26,00	25,30	,96	,49	1,61	,19	4,67	799,67	3,54	18,32	37,75	,95			
12	26,00	25,30	1,04	,50	1,69	,20	4,68	806,02	3,60	18,43	36,95	,95			
13	26,00	25,30	1,08	,51	1,71	,20	4,70	813,12	3,66	17,98	36,40	,95			
14	26,00	25,40	1,10	,52	1,69	,21	4,72	821,00	3,73	17,60	36,20	,95			
15	26,10	25,40	1,10	,52	1,69	,21	4,74	829,72	3,80	17,23	36,05	,95			
16	26,10	25,40	1,09	,52	1,68	,21	4,76	839,26	3,87	17,05	36,05	,95			
17	26,10	25,50	1,08	,51	1,71	,20	4,79	849,48	3,94	16,95	36,10	,95			
18	26,10	25,50	1,07	,51	1,69	,20	4,81	860,22	4,01	17,17	36,20	,95			
19	26,10	25,40	1,06	,51	1,68	,20	4,83	871,30	4,08	17,43	36,50	,94			
20	26,10	25,30	1,06	,51	1,68	,20	4,86	882,56	4,16	17,62	36,55	,94			
21	26,10	25,30	1,07	,51	1,69	,20	4,88	893,84	4,24	17,79	36,70	,94			
22	26,10	25,30	1,10	,52	1,69	,21	4,91	904,95	4,32	18,05	36,65	,94			
23	26,10	25,30	1,12	,52	1,73	,21	4,94	915,74	4,40	18,06	36,45	,94			
24	26,10	25,20	1,12	,52	1,73	,21	4,97	926,04	4,48	18,10	36,40	,94			
25	26,20	25,20	1,11	,52	1,71	,21	5,00	935,70	4,57	18,24	37,95	,94			

Figura 16. Interfaz de IBM® SPSS® Statistics v.23 con datos organizados según variables.

Entre los análisis estadísticos capaces de estudiar dependencias o interdependencias encontramos la correlación bivariada. Se trata de una técnica estadística destinada a averiguar si dos variables poseen alguna relación entre sí, cómo de fuerte es esa relación y que dirección tiene. En este trabajo se usa la correlación bivariada para encontrar aquellas variables con mayor influencia en la concentración de ácido sulfhídrico en la atmósfera de los colectores.

Para su realización se utiliza el coeficiente de correlación de Pearson, el cual es considerado el mejor para estudiar el grado de relación lineal que tienen dos variables cuantitativas (Pardo and Merino, 2002). Este coeficiente toma valores entre -1 y 1, sucediendo que, cuanto más alejado esté del 0, mayor será la correlación, positiva (directa) o negativa (indirecta) en función del signo. También se recoge el nivel de

significación del análisis, según el cual si posee un valor inferior a 0,05 existe correlación estadísticamente significativa.

Otra herramienta útil usada a través de SPSS es el análisis de factores o análisis de componentes principales. Se trata de un análisis multivariante que tiene como objetivos la reducción de variables y su interpretación. Es posible que un reducido número de factores puedan explicar el comportamiento de todas las variables del estudio sin perder demasiada información. A menudo se revelan relaciones no esperadas y, como consecuencia, interpretaciones a las que no se hubiera llegado por otros métodos (Johnson and Wichern, 2007). Por lo tanto, puede ayudar a explicar el comportamiento del sistema desde una simplificación del mismo.

Con el fin de comprobar si las variables que intervienen en los modelos empíricos simulados pueden simplificarse se plantea un análisis de factores. Para la extracción de los factores se utiliza el análisis de componentes principales (ACP), que se basa en formar combinaciones lineales no correlacionadas de las variables de estudio. El resultado es un número de componentes menor al número de variables inicial, en el que el primero de ellos explica un mayor porcentaje de la varianza, y los siguientes dan explicación a porcentajes menores de la varianza (Gazzaz et al., 2012).

Una vez realizado el análisis estadístico, se procede a ejecutar una regresión lineal múltiple a cada modelo para calcular la concentración de ácido sulfúrico en la atmósfera de los colectores. Finalmente, se realiza un análisis de sensibilidad al modelo que mejor comportamiento muestre para estudiar la sensibilidad del ajuste obtenido respecto a las variables elegidas (Hall et al., 2009).



5 RESULTADOS

5.1 MODELO BASE: J. S. MATOS Y E. R. DE SOUSA (1992)

5.1.1 Simulación

Para un mejor ajuste a los valores medidos en campo, en la Tabla 1 se presentan algunos de los valores tomados respecto a varios de los parámetros del modelo y que están dentro de los rangos propuestos en la bibliografía (Hvitved-Jacobsen et al., 2013; Matos and de Sousa, 1992; U.S. EPA, 1985):

Tabla 1. Valores adoptados para las variables simuladas en Zarandona y La Venta. Modelo base.

	M' (m/h)	m (-)	u_{air}/u (-)	s (m/m)	Diámetro (m)	fp (-)
La Venta	0.70×10^{-3}	0.96	0.65	0.002	2.0	0.94 - 1.00
Zarandona	0.32×10^{-3}	0.96	0.65	0.002	2.8	0.96 - 1.00

A la vista de la Tabla 1 la principal diferencia entre los valores de las variables utilizadas para simular Zarandona y La Venta aparece en el parámetro M' , de generación de sulfuros debido al biofilm, al que se le han asignado valores más elevados en la zona de La Venta como consecuencia de que en dicha zona se observa que el biofilm presenta una mayor actividad en vista de los valores puntuales medidos. Además de que el biofilm en la zona de La Venta posee un mayor desarrollo, la diferencia en este parámetro también puede deberse a que como dichas aguas presentan tiempos de retención hidráulica superiores (2 horas superiores en media) a los de la zona de Zarandona, y se facilita el proceso de hidrólisis de la materia orgánica biodegradables y así su posible uso por parte de los microorganismos anaerobios.

A continuación, se presentan los resultados de los valores simulados para los sulfuros en el agua residual, $[S]_{aq}$, y los sulfuros en la atmósfera, $[S]_{atm}$, junto con los valores puntuales medidos mediante los kits colorimétricos y las mediciones en continuo en la atmósfera de los colectores a lo largo de diversos días de medición.

En la Figura 18 y Figura 20, para poder apreciar mejor la evolución de los valores puntuales de ácido sulfhídrico medidos en la atmósfera del colector, se ha trazado una curva suavizada. Ésta consiste en una curva de media móvil de 20 valores respecto a la original y que se visualiza en color rojo.

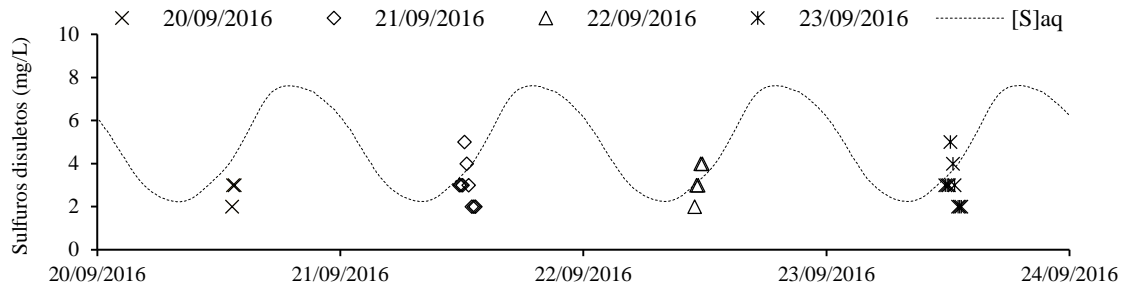


Figura 17. Simulación de sulfuros disueltos junto a valores puntuales de La Venta. Modelo base.

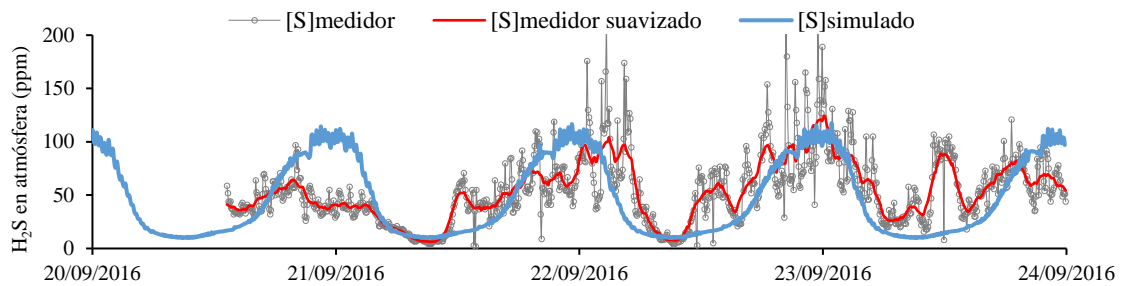


Figura 18. Simulación de ácido sulfhídrico en atmósfera de la conducción de La Venta. Modelo base.

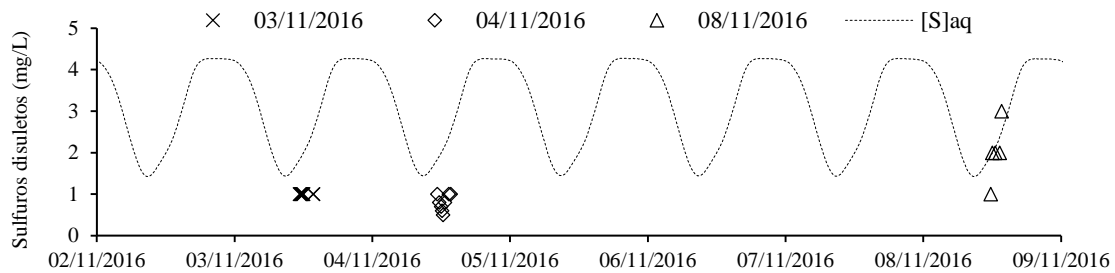


Figura 19. Simulación de sulfuros disueltos junto a valores puntuales de Zarandona. Modelo base.

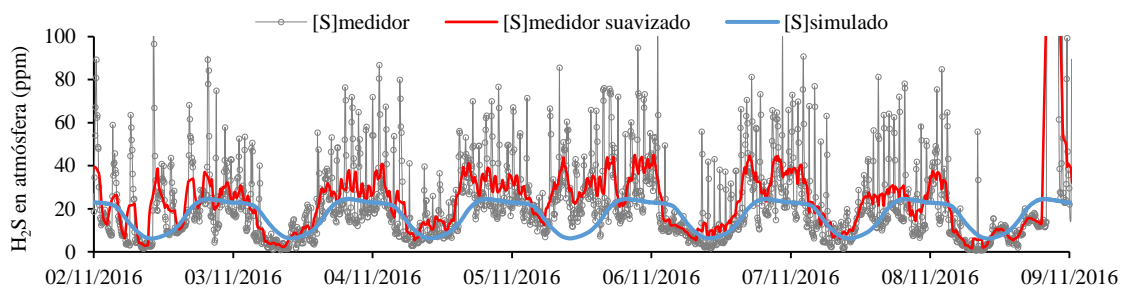


Figura 20. Simulación de ácido sulfhídrico en atmósfera de la conducción de Zarandona. Modelo base.

Respecto a la Figura 17 y Figura 19, para los valores puntuales de sulfuros disueltos solo se disponen datos de 10:00h a 14:00h, debido al horario en el que se realizó la campaña de muestreo, por lo que no es posible comprobar de forma precisa el ajuste de dicha simulación.



Comparando los valores simulados con los medidos suavizados se observa cómo, de forma generalizada, se marca la tendencia de la evolución del sulfhídrico en el interior de los colectores, aunque en ciertos periodos temporales aparezcan diferencias. En la simulación de los valores de ácido sulfhídrico en atmósfera $[S]_{atm}$ resulta de mucha importancia el parámetro de colmatación del biofilm que rodea al perímetro seco de la conducción, f_p , dado que regula la extracción de sulfhídrico de la atmósfera del colector para pasar a ser absorbido por la conducción que, a pesar de los elevados valores que adopta ($f_p = 0.94$ a 1.0) absorbe en su totalidad el ácido sulfhídrico que circula por esta.

5.1.2 Análisis estadístico

El análisis estadístico presenta, en primer lugar, los valores de correlación bivariada de Pearson para cada pareja de variables disponibles. Los resultados para ambos puntos de estudio se pueden apreciar en la Tabla 2 y Tabla 3.

Tabla 2. Matriz de correlaciones bivariadas para La Venta. Modelo base.

	T_{atm}	T_{agua}	Caudal	Calado	U_{agua}	Vol	TRH	DBO_5	$[S]_{aq}$	$[S]_{atm}$	$[S]_{suav}$
Tatm	1.00	-0.21	-0.33	-0.35	-0.39	-0.35	0.23	-0.32	0.30	0.55	0.42
Tagua	-0.21	1.00	0.32	0.32	0.32	0.32	-0.89	0.90	0.80	0.29	0.38
Caudal	-0.33	0.32	1.00	1.00	0.98	1.00	0.02	0.39	0.06	-0.44	-0.40
Calado	-0.35	0.32	1.00	1.00	0.99	1.00	0.01	0.38	0.05	-0.46	-0.42
Uagua	-0.39	0.32	0.98	0.99	1.00	0.98	0.00	0.39	0.04	-0.47	-0.44
Vol	-0.35	0.32	1.00	1.00	0.98	1.00	0.01	0.38	0.05	-0.45	-0.41
TRH	0.23	-0.89	0.02	0.01	0.00	0.01	1.00	-0.76	-0.70	-0.40	-0.51
DBO₅	-0.32	0.90	0.39	0.38	0.39	0.38	-0.76	1.00	0.60	0.07	0.14
[S]_{aq}	0.30	0.80	0.06	0.05	0.04	0.05	-0.70	0.60	1.00	0.74	0.68
[S]_{atm}	0.55	0.29	-0.44	-0.46	-0.47	-0.45	-0.40	0.07	0.74	1.00	0.79
[S]_{suav}	0.42	0.38	-0.40	-0.42	-0.44	-0.41	-0.51	0.14	0.68	0.79	1.00

Donde: T_{atm} es la temperatura del aire en el interior de la conducción ($^{\circ}C$); T_{agua} es la temperatura del agua residual circulando por la conducción ($^{\circ}C$); *Caudal* es el caudal circulante por la tubería (m^3/s); *Calado* es la altura de la lámina de agua en la conducción; *Uagua* es la velocidad del agua en la conducción (m/s); *Vol* es la proporción de volumen ocupado por el agua respecto al total de la conducción (tanto por uno); *TRH* es el tiempo de retención hidráulica (h); DBO_5 es la demanda bioquímica de oxígeno del agua residual (mg/L); $[S]_{aq}$ es la concentración simulada de sulfuros disueltos en el agua residual (mg/L); $[S]_{atm}$ es la concentración simulada

de ácido sulfhídrico en la atmósfera del colector (ppm); $[S]_{suav}$ es la concentración medida de H_2S en la atmósfera del colector tras realizar una media móvil de 20 valores (ppm).

Tabla 3. Matriz de correlaciones bivariadas para Zarandona. Modelo base.

	Tatm	Tagua	Caudal	Calado	Uagua	Vol	TRH	DBO ₅	[S] _{aq}	[S] _{atm}	[S] _{suav}
Tatm	1.00	0.72	0.39	0.40	0.42	0.37	-0.59	0.63	0.03	-0.13	0.10
Tagua	0.72	1.00	0.80	0.80	0.81	0.78	-0.88	0.90	0.50	0.28	0.57
Caudal	0.39	0.80	1.00	1.00	0.98	0.99	-0.93	0.73	0.65	0.44	0.66
Calado	0.40	0.80	1.00	1.00	0.98	0.99	-0.93	0.73	0.66	0.45	0.67
Uagua	0.42	0.81	0.98	0.98	1.00	0.98	-0.91	0.75	0.62	0.41	0.65
Vol	0.37	0.78	0.99	0.99	0.98	1.00	-0.92	0.71	0.66	0.46	0.67
TRH	-0.59	-0.88	-0.93	-0.93	-0.91	-0.92	1.00	-0.76	-0.54	-0.33	-0.56
DBO ₅	0.63	0.90	0.73	0.73	0.75	0.71	-0.76	1.00	0.28	0.03	0.45
[S] _{aq}	0.03	0.50	0.65	0.66	0.62	0.66	-0.54	0.28	1.00	0.96	0.88
[S] _{atm}	-0.13	0.28	0.44	0.45	0.41	0.46	-0.33	0.03	0.96	1.00	0.81
[S] _{suav}	0.10	0.57	0.66	0.67	0.65	0.67	-0.56	0.45	0.88	0.81	1.00

Se observan algunas correlaciones entre variables que nos van a permitir trazar a posteriori la regresión lineal múltiple que permita predecir la variable $[S]_{suav}$, como es el caso de la correlación de $R = 0.67$ con el porcentaje de llenado de la conducción, Vol , para Zarandona. O la correlación de $R = -0.51$ con el TRH en el caso de La Venta. Estos valores serán iguales para todos los modelos, pues de un modelo a otro permanecen iguales los datos hidráulicos y sólo varían los resultados de la simulación, $[S]_{aq}$, $[S]_{atm}$ y $[S]_{suav}$; y la carga orgánica, DBO_5 para este caso.

Para tratar de complementar la información derivada de la matriz de correlaciones bivariadas, se ha realizado un análisis estadístico de componentes principales (ACP), a partir de dichos componentes se puede interpretar cómo se agrupan las variables. En la Tabla 4 y Tabla 5 se presenta la extracción de componentes principales para La Venta y Zarandona, respectivamente. En el caso de La Venta, se han elegido tres componentes principales que explican el 45.23%, 35.91% y el 11.87% respectivamente, lo que supone una explicación total de 93.02% de la varianza total. Para Zarandona han sido dos los componentes extraídos explicando un 88.7% de la varianza de los datos (69.52% y 19.18% cada componente).



Tabla 4. Matriz de varianza total explicada y extracción de componentes principales para La Venta.
Modelo base.

Componente	Autovalores iniciales			Sumas de extracción de cargas al cuadrado		
	Total	% de varianza	% acumulado	Total	% de varianza	% acumulado
1	4.98	45.23	45.23	4.98	45.23	45.23
2	3.95	35.91	81.15	3.95	35.91	81.15
3	1.31	11.87	93.02	1.31	11.87	93.02
4	0.35	3.20	96.22			
5	0.21	1.93	98.15			
6	0.10	0.92	99.07			
7	0.06	0.58	99.66			
8	0.02	0.20	99.86			
9	0.01	0.09	99.95			
10	0.00	0.04	99.98			
11	0.00	0.02	100.00			

Tabla 5. Matriz de varianza total explicada y extracción de componentes principale para Zarandona.
Modelo base

Componente	Autovalores iniciales			Sumas de extracción de cargas al cuadrado		
	Total	% de varianza	% acumulado	Total	% de varianza	% acumulado
1	7.65	69.52	69.52	7.65	69.52	69.52
2	2.11	19.18	88.70	2.11	19.18	88.70
3	0.67	6.06	94.77			
4	0.33	3.04	97.80			
5	0.11	1.00	98.80			
6	0.08	0.70	99.50			
7	0.03	0.26	99.77			
8	0.02	0.15	99.92			
9	0.01	0.05	99.97			
10	0.00	0.03	99.99			
11	0.00	0.01	100.00			

En la Tabla 6 y Tabla 7 aparecen las correlaciones de cada componente principal con cada variable y se han representado solo aquellas con $R > 0.3$. Para La Venta, el componente 1 podría referirse al proceso relacionado con la concentración de ácido sulfhídrico en la conducción, mientras que en el caso de Zarandona el primer componente acumula casi toda la información del proceso dejando en el segundo sólo en relevancia la temperatura de la atmósfera de la conducción y la concentración de sulfhídrico en ésta. A priori, y a la vista de los valores estudiados, no se obtienen componentes principales que permitan concluir el uso de unas variables frente a otras con claridad.

Tabla 6. Matriz de correlación entre variables y componentes principales para La Venta. Modelo base.

	Componentes principales		
	1	2	3
Tatm	-0.54		0.75
Tagua	0.35	0.91	
Caudal	0.96		
Calado	0.96		
Uagua	0.97		
Vol	0.96		
TRH		-0.89	0.39
DBO₅	0.47	0.75	
[S]aq		0.94	
[S]atm	-0.59	0.65	0.34
[S]suav	-0.53	0.69	

Tabla 7. Matriz de correlación entre variables y componentes principales para Zarandona. Modelo base.

	Componentes principales	
	1	2
Tatm	0.49	-0.66
Tagua	0.89	-0.31
Caudal	0.97	
Calado	0.97	
Uagua	0.96	
Vol	0.96	
TRH	-0.94	
DBO₅	0.78	-0.46
[S]aq	0.73	0.65
[S]atm	0.53	0.80
[S]suav	0.76	0.50

5.1.3 Regresión

A continuación, y a la vista de los resultados presentados en el apartado anterior, se han elegido una serie de variables para poder ajustar los valores de ácido sulfhídrico medidos en la atmósfera del colector, $[S]_{suav}$, componente cuya concentración a lo largo del tiempo interesa conocer para posibilitar el posterior control del mismo.

Las variables seleccionadas finalmente son la proporción de volumen ocupado por el agua residual, Vol , el tiempo de retención hidráulico, TRH , la demanda bioquímica de oxígeno a los cinco días, DBO_5 , y el sulfuro disuelto simulado en el agua residual, $[S]_{aq}$, del modelo empírico aplicado. Se han elegido así debido a dos ideas principales: respetar las variables de mayor correlación con $[S]_{suav}$ y dotar de sentido físico a la regresión, planteando que en ella aparezcan aquellas variables teóricamente clave como son la carga orgánica o el sulfuro disuelto en agua residual.



$$[S]_{atm_{Reg.Venta.Base}} = -172.027 \cdot Vol - 7.639 \cdot TRH + 0.096 \cdot DBO_5 + 10.669 \cdot [S]_{aq} + 116.894 \quad (5.1)$$

$$[S]_{atm_{Reg.Zarand.Base}} = 5.837 \cdot Vol + 1.371 \cdot TRH + 0.026 \cdot DBO_5 + 9.06 \cdot [S]_{aq} - 22.679 \quad (5.2)$$

En el caso de La Venta se obtiene un coeficiente de determinación $R^2 = 0.72$ y en el caso de Zarandona R^2 toma valor de 0.84. En la Figura 21 y Figura 22 se presentan los valores obtenidos mediante la regresión lineal, ecuaciones (5.1) y (5.2), frente a los valores simulados a partir del modelo empírico y los valores medidos durante la campaña de campo. Los datos se representan para 48 horas de medición en La Venta y Zarandona.

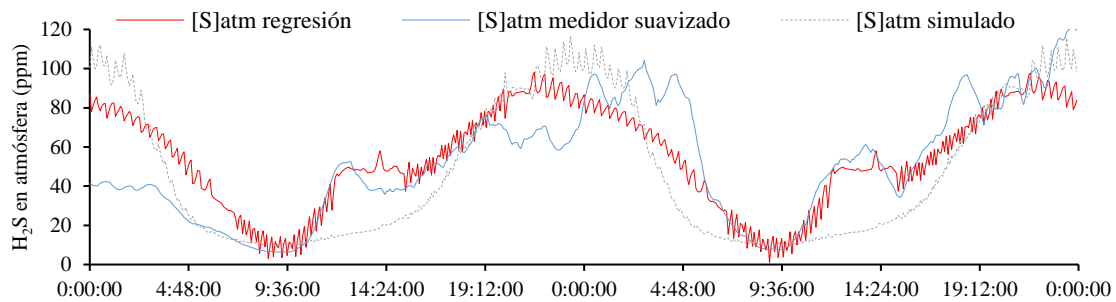


Figura 21. H_2S en atmósfera de conducción simulado con modelo base, ajustado por regresión lineal y medido suavizado con media móvil. La Venta.

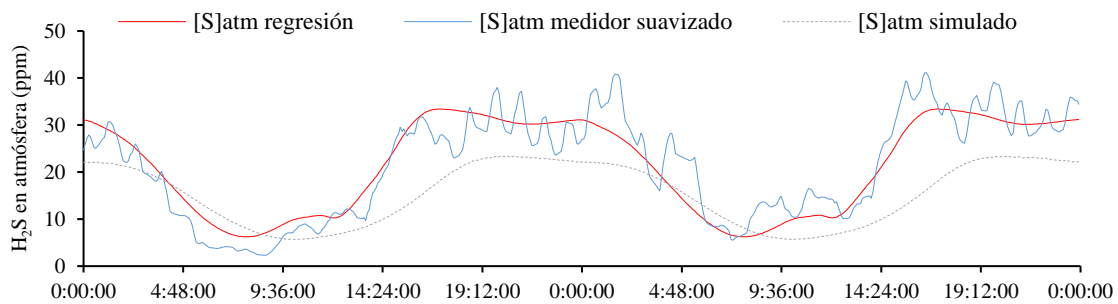


Figura 22. H_2S en atmósfera de conducción simulado con modelo base, ajustado por regresión lineal y medido suavizado con media móvil. Zarandona.

5.2 MODELO DE A. G. BOON Y A. R. LISTER (1975)

5.2.1 Simulación

De forma análoga al caso anterior, en la Tabla 8 se presentan los valores de las variables determinantes del modelo empírico que nos ocupa.

Tabla 8. Valores adoptados para las variables simuladas en Zarandona y La Venta. Modelo Boon y Lister.

	Cte. (m/h)	m (-)	u_{air}/u (-)	s (m/m)	Diámetro (m)	fp (-)
La Venta	1×10^{-3}	0.96	0.65	0.002	2.0	0.96 - 1.00
Zarandona	0.5×10^{-3}	0.96	0.65	0.002	2.8	0.97 - 1.00

Destaca el valor de la constante empleado en ambos puntos de estudio, pues es significativamente superior al 0.023×10^{-3} de la ecuación original. Se ha visto necesario aumentar dicho valor para poder ajustar el modelo a los datos de campo, al no compartirse las mismas condiciones en los puntos de estudio de este trabajo y en los experimentos que dieron lugar a la ecuación (4.23). Esta constante hace el papel del parámetro M' del modelo de J. S. Matos y E. R. de Sousa, y en la simulación de ese apartado ya se vio que el punto de La Venta poseía mayor M' , aquí sucede de igual manera, ya sea debido al mayor tiempo de retención hidráulica o al mayor desarrollo del biofilm.

Desde la Figura 23 a la Figura 26 se recogen los valores de la simulación para varios días de medición. Tanto para los sulfuros disueltos en la fase acuosa, $[S]_{aq}$, junto a los muestreos puntuales; como para el ácido sulfhídrico en atmósfera, $[S]_{atm}$, junto a la medición en continuo y su curva suavizada por media móvil.

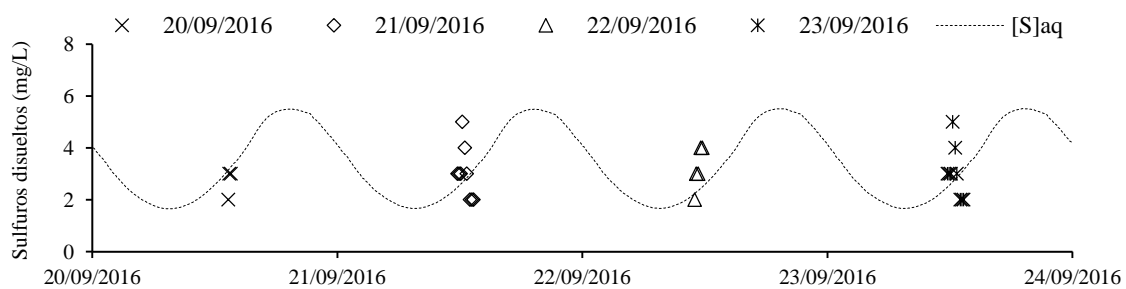


Figura 23. Simulación de sulfuros disueltos junto a valores puntuales de La Venta. Modelo Boon y Lister.

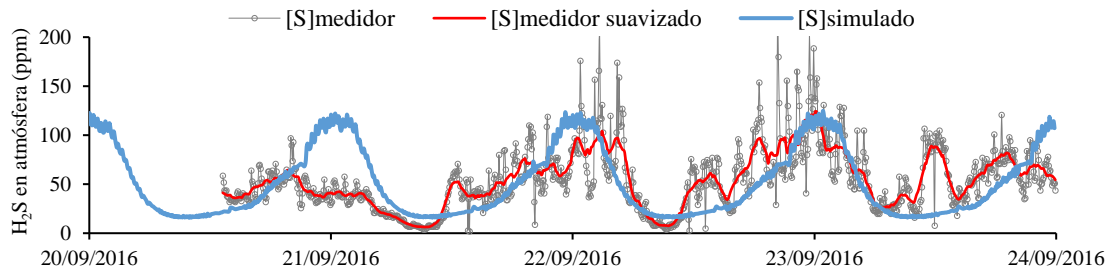


Figura 24. Simulación de ácido sulfhídrico en atmósfera de la conducción de La Venta. Modelo Boon y Lister.

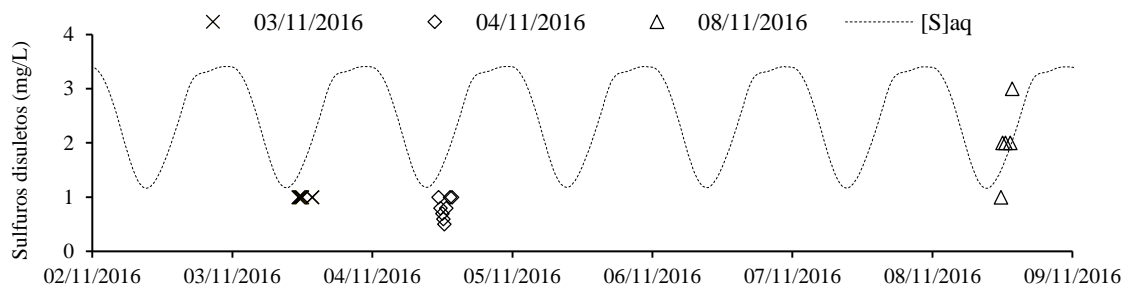


Figura 25. Simulación de sulfuros disueltos junto a valores puntuales de Zarandona. Modelo Boon y Lister.

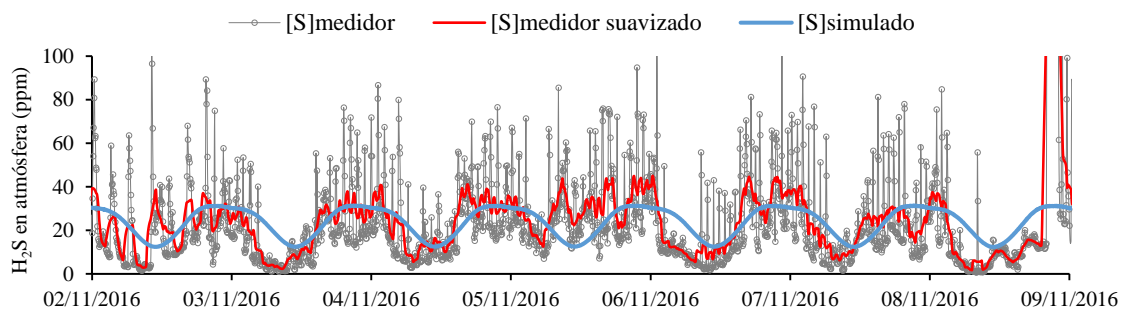


Figura 26. Simulación de ácido sulfhídrico en atmósfera de la conducción de Zarandona. Modelo Boon y Lister.

Atendiendo a la Figura 23 y Figura 25, se aprecia que sucede el mismo fenómeno que en el modelo base, pues debido a la limitación horaria del muestreo no es posible comprobar de forma precisa el ajuste de la simulación.

En cuanto a la simulación en la atmósfera de la conducción (Figura 24 y Figura 26), se aprecia, de forma genérica, un comportamiento de la curva de simulación parecido a la curva del medidor suavizado.

5.2.2 Análisis estadístico

En la Tabla 9 y Tabla 10 se presentan las correlaciones bivariadas de Pearson para los puntos de La Venta y Zarandona respectivamente.

Tabla 9. Matriz de correlaciones bivariadas en La Venta. Modelo Boom y Lister.

	Tatm	Tagua	Caudal	Calado	Uagua	Vol	TRH	DQO	[S] _{aq}	[S] _{atm}	[S] _{suav}
Tatm	1.00	-0.24	-0.40	-0.41	-0.44	-0.41	0.23	0.48	0.24	0.63	0.38
Tagua	-0.24	1.00	0.35	0.34	0.35	0.34	-0.88	-0.71	0.82	-0.05	0.39
Caudal	-0.40	0.35	1.00	1.00	0.98	1.00	0.02	-0.76	0.12	-0.72	-0.32
Calado	-0.41	0.34	1.00	1.00	0.99	1.00	0.02	-0.76	0.11	-0.74	-0.33
Uagua	-0.44	0.35	0.98	0.99	1.00	0.98	0.00	-0.77	0.10	-0.76	-0.34
Vol	-0.41	0.34	1.00	1.00	0.98	1.00	0.01	-0.76	0.11	-0.73	-0.32
TRH	0.23	-0.88	0.02	0.02	0.00	0.01	1.00	0.42	-0.71	-0.22	-0.51
DQO	0.48	-0.71	-0.76	-0.76	-0.77	-0.76	0.42	1.00	-0.37	0.65	0.13
[S] _{aq}	0.24	0.82	0.12	0.11	0.10	0.11	-0.71	-0.37	1.00	0.38	0.64
[S] _{atm}	0.63	-0.05	-0.72	-0.74	-0.76	-0.73	-0.22	0.65	0.38	1.00	0.62
[S] _{suav}	0.38	0.39	-0.32	-0.33	-0.34	-0.32	-0.51	0.13	0.64	0.62	1.00

Tabla 10. Matriz de correlaciones bivariadas en Zarandona. Modelo Boom y Lister.

	Tatm	Tagua	Caudal	Calado	Uagua	Vol	TRH	DQO	[S] _{aq}	[S] _{atm}	[S] _{suav}
Tatm	1.00	0.72	0.39	0.40	0.42	0.37	-0.59	0.68	0.00	-0.24	0.10
Tagua	0.72	1.00	0.80	0.80	0.81	0.78	-0.88	0.90	0.47	0.15	0.57
Caudal	0.39	0.80	1.00	1.00	0.98	0.99	-0.93	0.70	0.64	0.34	0.66
Calado	0.40	0.80	1.00	1.00	0.98	0.99	-0.93	0.71	0.65	0.35	0.67
Uagua	0.42	0.81	0.98	0.98	1.00	0.98	-0.91	0.73	0.60	0.30	0.65
Vol	0.37	0.78	0.99	0.99	0.98	1.00	-0.92	0.68	0.65	0.36	0.67
TRH	-0.59	-0.88	-0.93	-0.93	-0.91	-0.92	1.00	-0.76	-0.53	-0.22	-0.56
DQO	0.68	0.90	0.70	0.71	0.73	0.68	-0.76	1.00	0.19	-0.17	0.40
[S] _{aq}	0.00	0.47	0.64	0.65	0.60	0.65	-0.53	0.19	1.00	0.93	0.88
[S] _{atm}	-0.24	0.15	0.34	0.35	0.30	0.36	-0.22	-0.17	0.93	1.00	0.74
[S] _{suav}	0.10	0.57	0.66	0.67	0.65	0.67	-0.56	0.40	0.88	0.74	1.00

Como ya se ha explicado, al tratarse de los mismos datos hidráulicos para todos los modelos, vuelven a aparecer las relaciones de -0.51 entre $[S]_{suav}$ y el tiempo de retención hidráulico, TRH , para La Venta; y de 0.67 para la relación entre $[S]_{suav}$ y la



proporción de llenado de la conducción, *Vol*, en Zarandona. Además, la carga orgánica en el agua residual, aquí expresada por la *DQO* obtiene valores de correlación algo menores que los obtenidos en el modelo base.

De nuevo, y para complementar la información obtenida tras realizar la matriz de correlaciones bivariadas, se procede a mostrar a continuación los resultados de un análisis estadístico de componentes principales (ACP). En la Tabla 11 Tabla 6 y Tabla 12 aparecen los resultados de la extracción de componentes principales, teniendo de nuevo tres componentes para La Venta que explican un 98.84% de la varianza total y dos componentes en Zarandona, explicando un 89.07%.

Tabla 11. Matriz de varianza total explicada y extracción de componentes principales para La Venta. Modelo Boon y Lister

Componente	Autovalores iniciales			Sumas de extracción de cargas al cuadrado		
	Total	% de varianza	% acumulado	Total	% de varianza	% acumulado
1	5.83	53.03	53.03	5.83	53.03	53.03
2	3.27	29.69	82.72	3.27	29.69	82.72
3	1.11	10.12	92.84	1.11	10.12	92.84
4	0.36	3.27	96.11			
5	0.24	2.22	98.33			
6	0.10	0.89	99.22			
7	0.05	0.43	99.65			
8	0.02	0.19	99.84			
9	0.01	0.11	99.95			
10	0.00	0.03	99.99			
11	0.00	0.01	100.00			

Tabla 12. Matriz de varianza total explicada y extracción de componentes principale para Zarandona. Modelo Boon y Lister.

Componente	Autovalores iniciales			Sumas de extracción de cargas al cuadrado		
	Total	% de varianza	% acumulado	Total	% de varianza	% acumulado
1	7.48	67.99	67.99	7.48	67.99	67.99
2	2.32	21.08	89.07	2.32	21.08	89.07
3	0.65	5.92	94.99			
4	0.32	2.87	97.86			
5	0.11	0.99	98.85			
6	0.07	0.65	99.50			
7	0.03	0.24	99.74			
8	0.02	0.15	99.89			
9	0.01	0.06	99.95			
10	0.00	0.04	99.99			
11	0.00	0.01	100.00			

Atendiendo a la Tabla 13, se aprecia un comportamiento de los componentes similar al modelo base, con un primer componente que podría responder a la concentración de sulfhídrico en la atmósfera de la conducción, englobando además variables hidráulicas y carga orgánica. El segundo componente relaciona el sulfhídrico medido con el tiempo de retención hidráulico, los sulfuros disueltos y la temperatura del agua, mientras que el tercero deja aislada la variable de temperatura de la atmósfera del colector.

Para el caso de Zarandona (Tabla 14), el segundo componente relaciona la temperatura de la atmósfera de la conducción con la concentración de sulfhídrico en la misma, representando la relación del modelo con la temperatura de la fase gaseosa y dejando el resto de información del al componente 1.

Pese a ello, no hay precisión suficiente en este análisis para decidir qué variables son las estrictamente necesarias en la regresión deseada.

Tabla 13. Matriz de correlación entre variables y componentes principales para La Venta. Modelo Boon y Lister.

	Componentes principales		
	1	2	3
Tatm	-.576		.740
Tagua	.448	.863	
Caudal	.958		
Calado	.965		
Uagua	.968		
Vol	.962		
TRH		-.883	.399
DQO	-.868	-.333	
[S]aq		.928	
[S]atm	-.821	.426	
[S]suav	-.373	.752	

Tabla 14. Matriz de correlación entre variables y componentes principales para Zarandona. Modelo Boon y Lister.

	Componentes principales	
	1	2
Tatm	.500	-.653
Tagua	.893	-.302
Caudal	.968	
Calado	.973	
Uagua	.963	
Vol	.964	
TRH	-.943	
DQO	.765	-.529
[S]aq	.703	.679
[S]atm	.402	.875
[S]suav	.750	.507



5.2.3 Regresión

Tal y como se realizó para el modelo base, se busca una regresión lineal multiparámica para ajustar los valores de ácido sulfhídrico medidos en la atmósfera del colector, $[S]_{suav}$. Las variables seleccionadas también coinciden con los criterios establecidos en el modelo base, siendo la proporción de volumen ocupado por el agua residual, Vol , el tiempo de retención hidráulico, TRH , la demanda química de oxígeno, DQO , y el sulfuro disuelto simulado en el agua residual, $[S]_{aq}$.

Las ecuaciones (5.3) y (5.4) recogen las regresiones propuestas para La Venta y Zarandona respectivamente. En el caso de La Venta se obtiene un coeficiente de determinación de $R^2 = 0.6$ y para Zarandona de $R^2 = 0.84$.

$$[S]_{atmReg.Venta.Boon} = -67.401 \cdot Vol - 4.441 \cdot TRH + 0.049 \cdot DQO + 13.587 \cdot [S]_{aq} + 18.303 \quad (5.3)$$

$$[S]_{atmReg.Zarand.Boon} = 17.419 \cdot Vol + 1.971 \cdot TRH + 0.019 \cdot DQO + 12.005 \cdot [S]_{aq} - 29.945 \quad (5.4)$$

En las Figuras 27 y 28, se pueden encontrar graficadas ambas regresiones en color rojo, junto a la curva de ácido sulfhídrico medida en campo y suavizada mediante media móvil, además de la simulada por el modelo empírico.

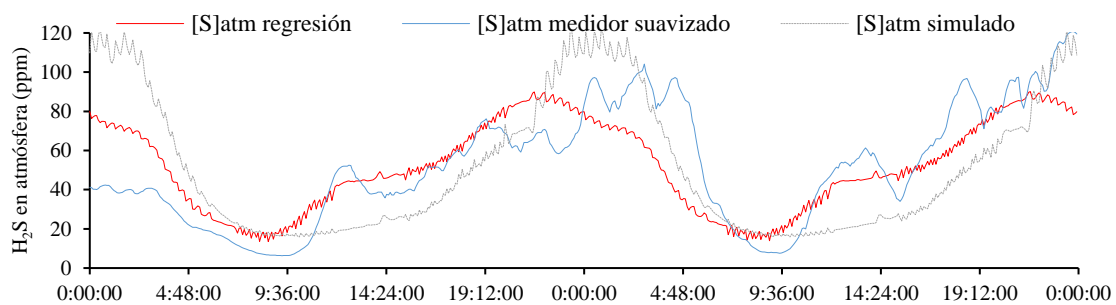


Figura 27. H_2S en atmósfera de conducción simulado con modelo de Boon y Lister, ajustado por regresión lineal y medido suavizado con media móvil. La Venta.

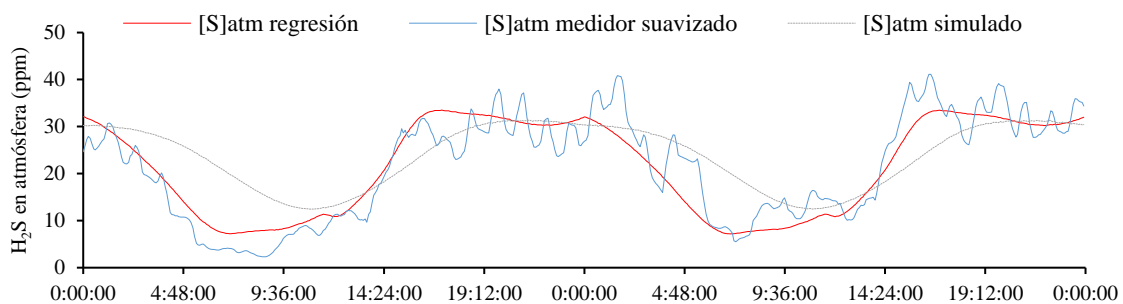


Figura 28. H_2S en atmósfera de conducción simulado con modelo de Boon y Lister, ajustado por regresión lineal y medido suavizado con media móvil. Zarandona.

5.3 MODELO DE S. ELMALEH ET AL. (1998)

5.3.1 Simulación

Tal y como se ha hecho para los modelos anteriores, a continuación se presentan los valores adquiridos en esta simulación por las variables determinantes para éste.

Tabla 15. Valores adoptados para las variables simuladas en Zarandona y La Venta. Modelo Elmaleh.

	Cte.	m	u_{air}/u	s	Diámetro	fp
	(m/h)	(-)	(-)	(m/m)	(m)	(-)
La Venta	3×10^{-6}	0.96	0.65	0.002	2.0	0.94 - 1.00
Zarandona	2×10^{-6}	0.96	0.65	0.002	2.8	0.99 - 1.00

Vuelve a existir una constante que modela la generación de sulfuros en el biofilm, la ecuación de generación empleada en el modelo (4.29) se creó para agua residual urbana reciclada, tomando esta constante el valor de 0.0052×10^{-3} . Este trabajo estudia agua residual urbana transportada en colectores para ser depurada, aún no ha sufrido ningún tratamiento para mejorar su calidad, por lo que se explica el cambio en los valores dados a esta constante para poder ajustar el modelo empírico. Además, vuelve a ser necesario que el punto de estudio de La Venta posea un valor mayor.

Desde la Figura 29 a la Figura 32 se presentan los resultados de la simulación para los dos puntos de estudio y para fase acuosa y gaseosa.

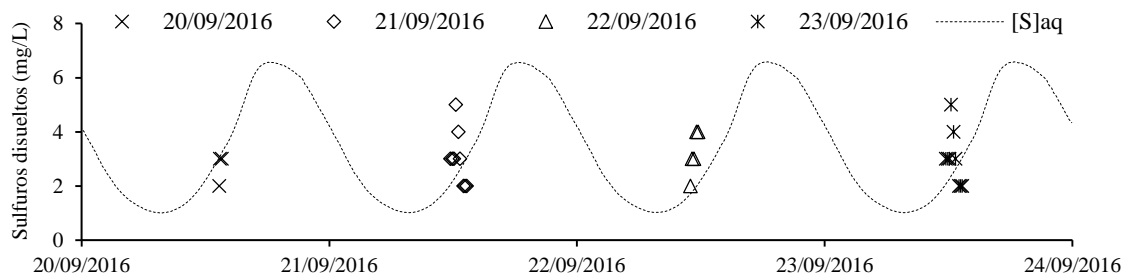


Figura 29. Simulación de sulfuros disueltos junto a valores puntuales de La Venta. Modelo Elmaleh.

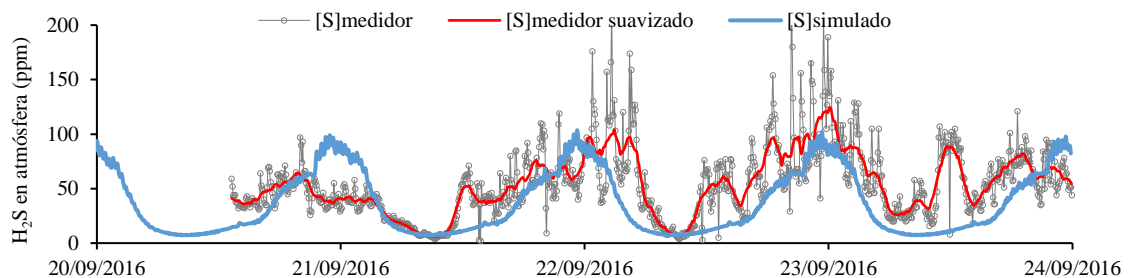


Figura 30. Simulación de ácido sulfhídrico en atmósfera de la conducción de La Venta. Modelo Elmaleh.

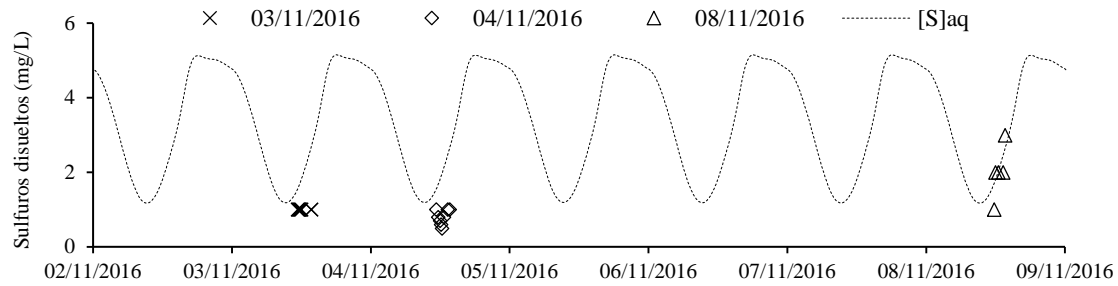


Figura 31. Simulación de sulfuros disueltos junto a valores puntuales de Zarandona. Modelo Elmaleh

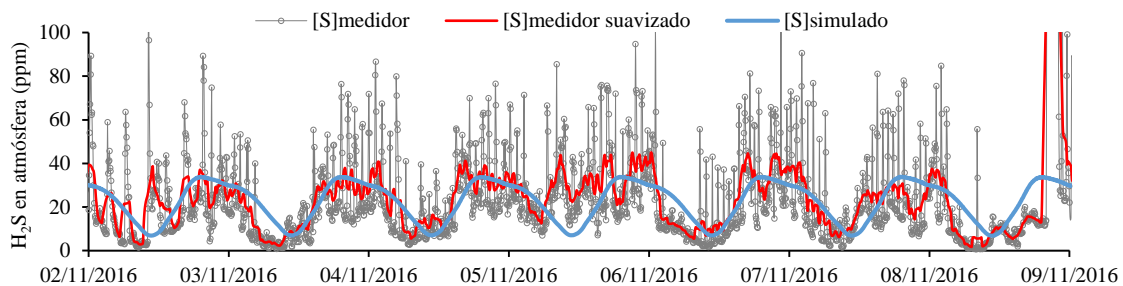


Figura 32. Simulación de ácido sulfhídrico en atmósfera de la conducción de Zarandona. Modelo Elmaleh.

Las simulaciones para fase gaseosa dejan un comportamiento del ácido sulfhídrico en atmósfera del colector similar al medido en la campaña de campo, mientras que las simulaciones de la fase acuosa no pueden entenderse como ajustadas al carecer de suficientes muestreos o estar éstos concentrados en unas pocas horas al día.

5.3.2 Análisis estadístico

Tabla 16. Matriz de correlaciones bivariadas para La Venta. Modelo Elmaleh.

	Tatm	Tagua	Caudal	Calado	Uagua	Vol	TRH	DQO	[S] _{aq}	[S] _{atm}	[S] _{suav}
Tatm	1.00	-0.24	-0.40	-0.41	-0.44	-0.41	0.23	-0.40	0.22	0.56	0.38
Tagua	-0.24	1.00	0.35	0.34	0.35	0.34	-0.88	0.90	0.83	0.20	0.39
Caudal	-0.40	0.35	1.00	1.00	0.98	1.00	0.02	0.44	0.18	-0.55	-0.32
Calado	-0.41	0.34	1.00	1.00	0.99	1.00	0.02	0.43	0.17	-0.56	-0.33
Uagua	-0.44	0.35	0.98	0.99	1.00	0.98	0.00	0.44	0.16	-0.57	-0.34
Vol	-0.41	0.34	1.00	1.00	0.98	1.00	0.01	0.44	0.17	-0.55	-0.32
TRH	0.23	-0.88	0.02	0.02	0.00	0.01	1.00	-0.76	-0.69	-0.39	-0.51
DQO	0.48	-0.71	-0.76	-0.76	-0.77	-0.76	0.42	1.00	-0.43	0.45	0.13
[S] _{aq}	0.22	0.83	0.18	0.17	0.16	0.17	-0.69	0.62	1.00	0.56	0.61
[S] _{atm}	0.56	0.20	-0.55	-0.56	-0.57	-0.55	-0.39	-0.02	0.56	1.00	0.69
[S] _{suav}	0.38	0.39	-0.32	-0.33	-0.34	-0.32	-0.51	0.13	0.61	0.69	1.00

Tabla 17. Matriz de correlaciones bivariadas para Zarandona. Modelo Elmaleh.

	Tatm	Tagua	Caudal	Calado	Uagua	Vol	TRH	DQO	[S] _{aq}	[S] _{atm}	[S] _{suav}
Tatm	1.00	0.72	0.39	0.40	0.42	0.37	-0.59	0.68	0.09	-0.09	0.10
Tagua	0.72	1.00	0.80	0.80	0.81	0.78	-0.88	0.90	0.56	0.32	0.57
Caudal	0.39	0.80	1.00	1.00	0.98	0.99	-0.93	0.70	0.66	0.43	0.66
Calado	0.40	0.80	1.00	1.00	0.98	0.99	-0.93	0.71	0.67	0.43	0.67
Uagua	0.42	0.81	0.98	0.98	1.00	0.98	-0.91	0.73	0.63	0.39	0.65
Vol	0.37	0.78	0.99	0.99	0.98	1.00	-0.92	0.68	0.67	0.44	0.67
TRH	-0.59	-0.88	-0.93	-0.93	-0.91	-0.92	1.00	-0.76	-0.56	-0.33	-0.56
DQO	0.68	0.90	0.70	0.71	0.73	0.68	-0.76	1.00	0.29	0.01	0.40
[S] _{aq}	0.09	0.56	0.66	0.67	0.63	0.67	-0.56	0.29	1.00	0.95	0.89
[S] _{atm}	-0.09	0.32	0.43	0.43	0.39	0.44	-0.33	0.01	0.95	1.00	0.81
[S] _{suav}	0.10	0.57	0.66	0.67	0.65	0.67	-0.56	0.40	0.89	0.81	1.00

En la Tabla 16 y Tabla 17 se exponen los valores de correlación entre las variables del modelo. Además de los valores ya vistos de las variables referentes a datos compartidos entre todos los modelos, la carga orgánica obtiene correlaciones similares al caso de A. G. Boon y A. R. Lister.

El análisis de componentes principales vuelve a resultar en tres componentes extraídos para La Venta y dos en Zarandona, con una varianza total explicada de 92.4% y 88.39% respectivamente (Tabla 18 y Tabla 19).

Tabla 18. Matriz de varianza total explicada y extracción de componentes principales en La Venta. Modelo Elmaleh

Componente	Autovalores iniciales			Sumas de extracción de cargas al cuadrado		
	Total	% de varianza	% acumulado	Total	% de varianza	% acumulado
1	5.18	47.06	47.06	5.18	47.06	47.06
2	3.77	34.27	81.33	3.77	34.27	81.33
3	1.22	11.07	92.40	1.22	11.07	92.40
4	0.39	3.56	95.96			
5	0.22	2.04	98.01			
6	0.09	0.84	98.85			
7	0.09	0.82	99.66			
8	0.02	0.19	99.86			
9	0.01	0.09	99.95			
10	0.00	0.03	99.99			
11	0.00	0.01	100.00			



Tabla 19. Matriz de varianza total explicada y extracción de componentes principale en Zarandona. Modelo Elmaleh.

Componente	Autovalores iniciales			Sumas de extracción de cargas al cuadrado		
	Total	% de varianza	% acumulado	Total	% de varianza	% acumulado
1	7.65	69.52	69.52	7.65	69.52	69.52
2	2.08	18.87	88.39	2.08	18.87	88.39
3	0.73	6.64	95.03			
4	0.30	2.69	97.72			
5	0.13	1.15	98.86			
6	0.07	0.67	99.54			
7	0.03	0.23	99.77			
8	0.02	0.14	99.91			
9	0.01	0.05	99.96			
10	0.00	0.03	99.99			
11	0.00	0.01	100.00			

Para el caso de La Venta (Tabla 20), se obtiene un primer componente que explica el 47.06% de la varianza total y que depende principalmente de las variables hidráulicas. Un segundo componente explicando el 34.27% incorpora la temperatura del agua, TRH, DQO y concentraciones en fase acuosa y gaseosa. El tercer y último componente comprende la temperatura en la atmósfera del colector y explica el 11.07% de la varianza total.

Tabla 20. Matriz de correlación entre variables y componentes principales para La Venta. Modelo Elmaleh.

	Componentes principales		
	1	2	3
Tatm	-.576		.719
Tagua	.512	.832	
Caudal	.954		
Calado	.959		
Uagua	.960		
Vol	.957		
TRH		-.882	.371
DQO	.628	.637	
[S]aq		.891	.307
[S]atm	-.574	.674	
[S]suav	-.325	.749	

Atendiendo ahora a los resultados para Zarandona, se aprecia en la Tabla 21 que el componente 2 recoge la temperatura y concentración de sulfhídrico simulado en la fase gaseosa, explicando el 18.87% de la varianza total, por lo que puede representar la influencia de la temperatura sobre del aire de la conducción en el proceso; mientras que el componente 1 abarca el resto de variables y explica el 69.52%.

Tal y como ocurría en los modelos anteriores, no se considera suficiente la nitidez de los resultados arrojados en el análisis de componentes principales.

Tabla 21. Matriz de correlación entre variables y componentes principales para Zarandona. Modelo Elmaleh.

	Componentes principales	
	1	2
Tatm	.504	-.639
Tagua	.899	
Caudal	.962	
Calado	.967	
Uagua	.958	
Vol	.959	
TRH	-.938	
DQO	.767	-.505
[S]aq	.752	.617
[S]atm	.528	.794
[S]suav	.757	.524

5.3.3 Regresión

La regresión lineal buscada para ajustar los valores de ácido sulfhídrico medidos en la atmósfera del colector, $[S]_{suav}$, va a coincidir en cuanto a variables involucradas con los modelos ya expuestos, siendo estas variables la proporción de volumen ocupado por el agua residual, Vol , el tiempo de retención hidráulico, TRH , la demanda química de oxígeno, DQO , y el sulfuro disuelto simulado en el agua residual, $[S]_{aq}$.

En las ecuaciones que siguen a estas líneas aparecen las regresiones propuestas, según los resultados del modelo de S. Elmaleh, para los puntos estudiados en este trabajo, obteniendo unos valores del coeficiente de determinación R^2 de 0.64 para La Venta y 0.82 para Zarandona.

$$[S]_{atmReg.Venta.Elmaleh} = -100.16 \cdot Vol - 10.614 \cdot TRH - 0.079 \cdot DQO + 9.572 \cdot [S]_{aq} + 149.897 \quad (5.5)$$

$$[S]_{atmReg.Zarand.Elmaleh} = 67.164 \cdot Vol + 1.747 \cdot TRH + 0.01 \cdot DQO + 6.3 \cdot [S]_{aq} - 20.638 \quad (5.6)$$



En la Figura 33 y Figura 34 se grafican estas regresiones acompañadas de los valores medidos en la atmósfera del colector y los valores simulados por el modelo empírico.

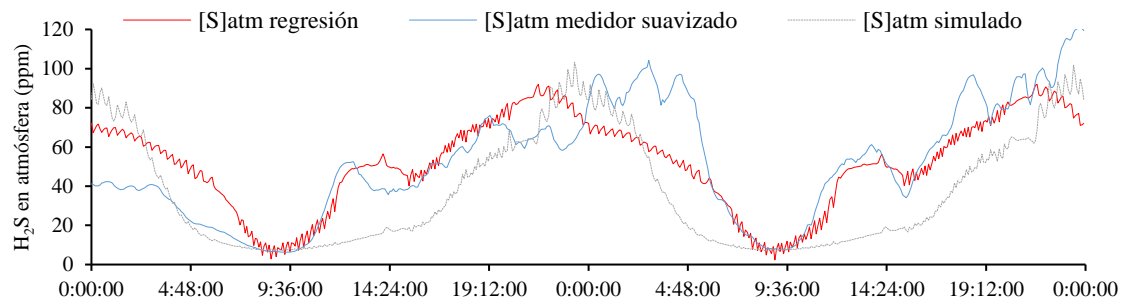


Figura 33. H₂S en atmósfera de conducción simulado con modelo de Elmaleh, ajustado por regresión lineal y medido suavizado con media móvil. La Venta.

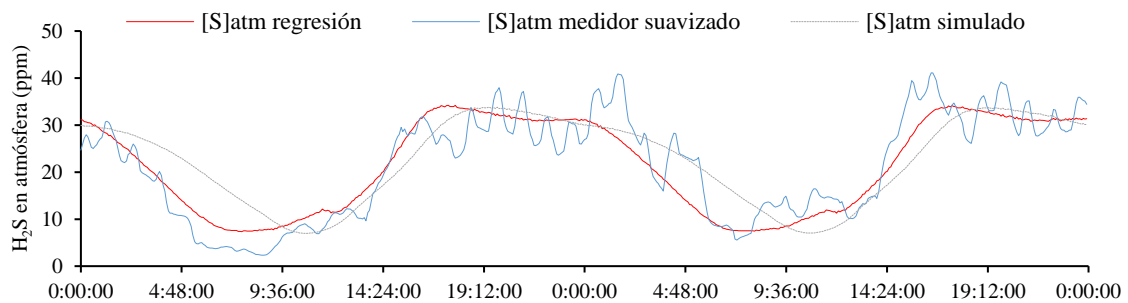


Figura 34. H₂S en atmósfera de conducción simulado con modelo de Elmaleh, ajustado por regresión lineal y medido suavizado con media móvil. Zarandona.

5.4 MODELO DE C. YONGSIRI ET AL. (2004)

5.4.1 Simulación

En la Tabla 22 se recogen ciertas variables usadas en la simulación del modelo empírico.

Tabla 22. Valores adoptados para las variables simuladas en Zarandona y La Venta. Modelo Yongsiri.

	So	f'	α	$K_L a_{H_2S}$	s	Diámetro	fp
	(mg/L)	(-)	(-)	(h ⁻¹)	(m/m)	(m)	(-)
La Venta	0	0.5	0.6	0.09 - 0.21	0.002	2.0	0.96 - 1.00
Zarandona	0	0.5	0.6	0.09 - 0.15	0.002	2.8	0.99 - 1.00

Tal y como se observa, durante la simulación se considera que la concentración de oxígeno disuelto en el agua residual es nula, tal y como atestiguan las sondas multiparamétricas usadas en la campaña de campo. El parámetro f' toma valor de 0.5, al suponerse el pH y pKa como 7. En cuanto al coeficiente de transferencia agua-aire para H_2S , $K_L a_{H_2S}$, se aprecia que es menor para el punto de Zarandona, ya que sus condiciones hidráulicas proporcionan un número de Froude más pequeño.

Desde la Figura 35 a la Figura 38, se encuentran los gráficos que resultan de la simulación. Tal y como se aprecia, este modelo no se ajusta correctamente a los datos tomados durante la campaña de campo, arrojando una simulación con valores muy planos y reducidos.

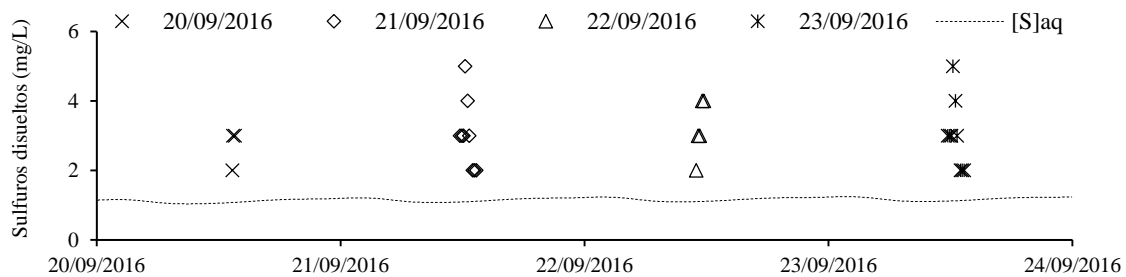


Figura 35. Simulación de sulfuros disueltos junto a valores puntuales de La Venta. Modelo Yongsiri.

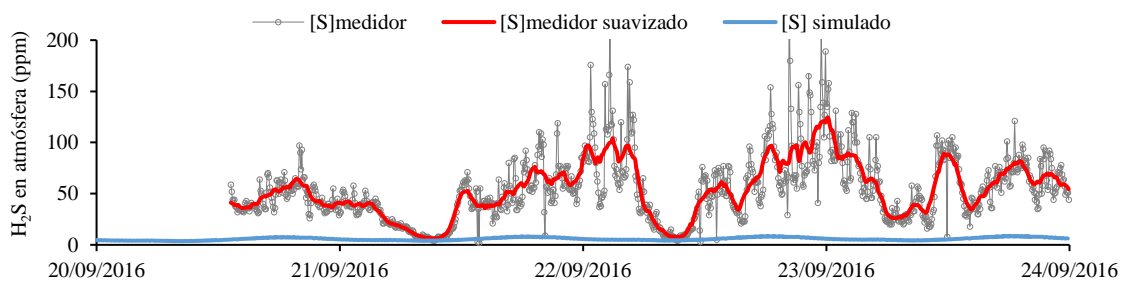


Figura 36. Simulación de ácido sulfhídrico en atmósfera de la conducción de La Venta. Modelo Yongsiri.

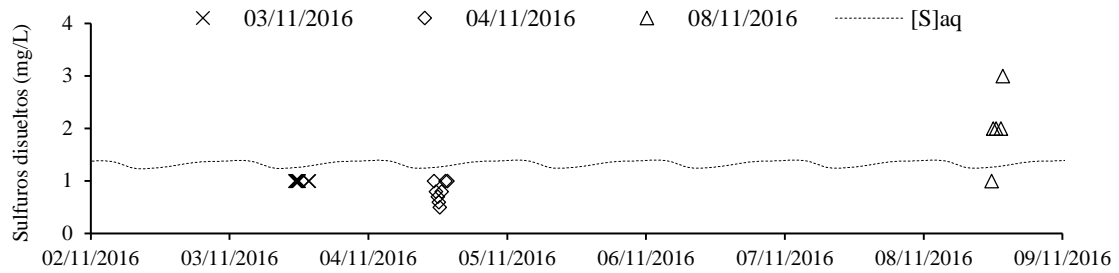


Figura 37. Simulación de sulfuros disueltos junto a valores puntuales de Zarandona. Modelo Yongsiri

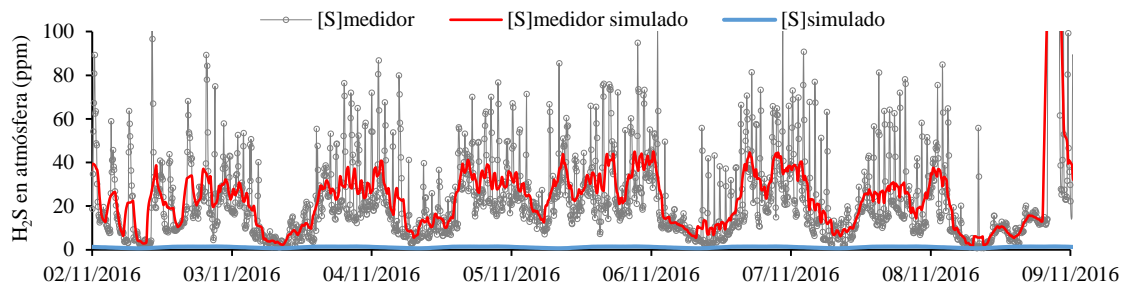


Figura 38. Simulación de ácido sulfhídrico en atmósfera de la conducción de Zarandona. Modelo Yongsiri.

Ante los resultados de este apartado, con una simulación que no se considera adecuada, se descarta aplicar cualquier tipo de análisis estadístico o intentar establecer regresión alguna, descartando el modelo empírico de cualquier análisis posterior en este trabajo.

5.5 MODELO DE O. LAHAV ET AL. (2004)

5.5.1 Simulación

Tabla 23. Valores adoptados para las variables simuladas en Zarandona y La Venta. Modelo Lahav.

	M' (m/h)	K (m/s)	u_{air}/u (-)	s (m/m)	Diámetro (m)	fp (-)
La Venta	0.70×10^{-3}	4×10^{-9}	0.65	0.002	2.0	0.94 - 1.00
Zarandona	0.32×10^{-3}	4×10^{-9}	0.65	0.002	2.8	0.97 - 1.00

La Tabla 23 muestra los valores de un grupo de variables relevantes en la simulación de este modelo empírico, para cada punto estudiado. El valor de M' es compartido con el modelo base, ya que este modelo de O. Lahav incluye como novedad sólo la parte de emisión sobre el caso base.

En las siguientes figuras aparecen graficadas las curvas resultantes de la simulación, donde encontramos que la simulación de la fase acuosa necesitaría tener unos datos de muestreos más distribuidos en el tiempo para poder realizar un buen ajuste (Figura 39 y Figura 41).

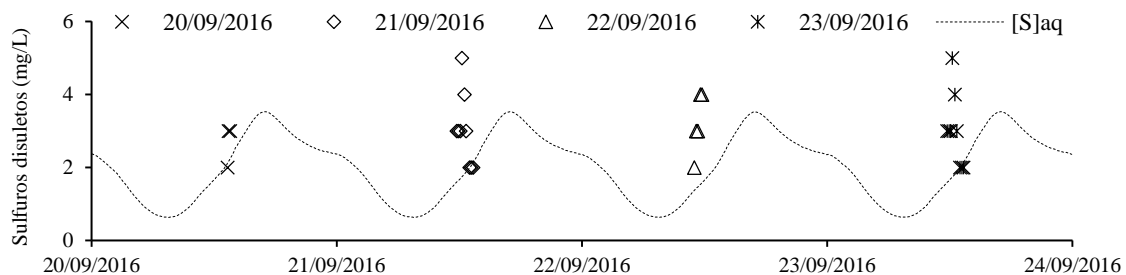


Figura 39. Simulación de sulfuros disueltos junto a valores puntuales de La Venta. Modelo Lahav.

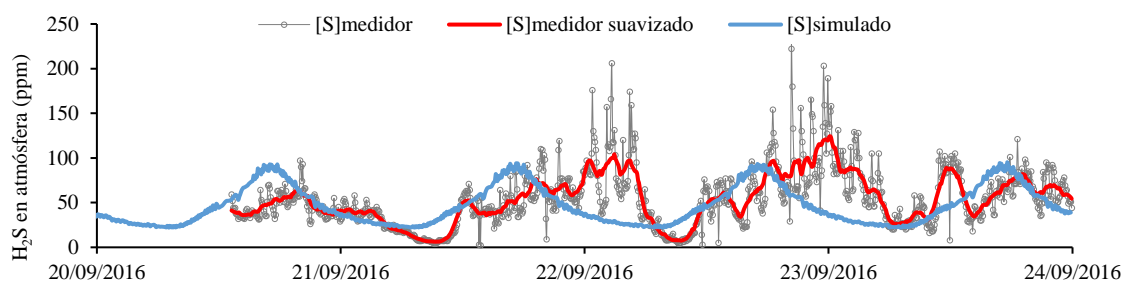


Figura 40. Simulación de ácido sulfhídrico en atmósfera de la conducción de La Venta. Modelo Lahav.

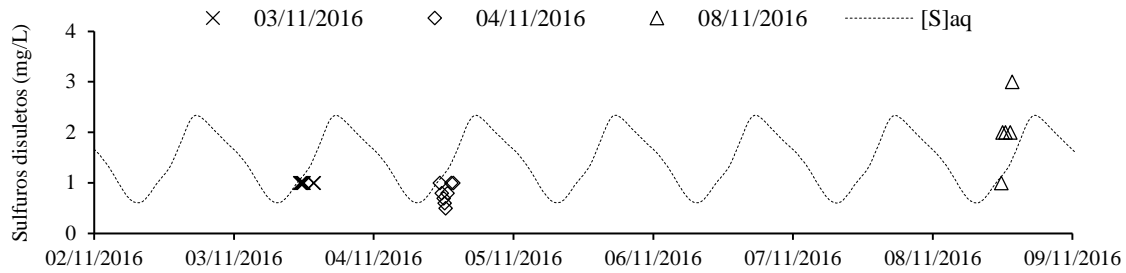


Figura 41. Simulación de sulfuros disueltos junto a valores puntuales de Zarandona. Modelo Lahav.

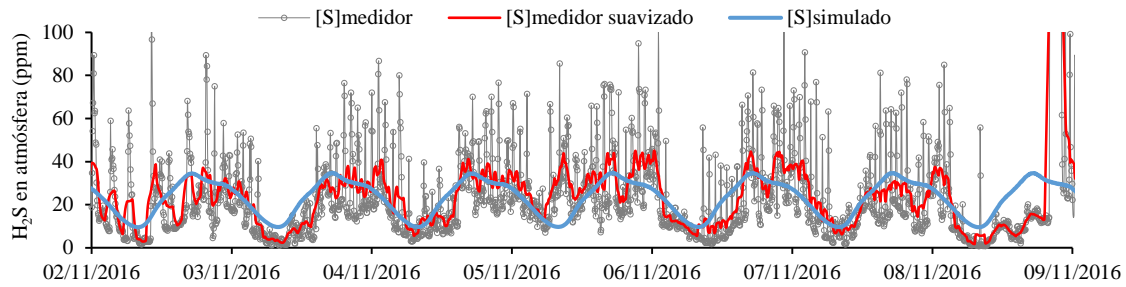


Figura 42. Simulación de ácido sulfhídrico en atmósfera de la conducción de Zarandona. Modelo Lahav.

La simulación de la fase gaseosa del modelo, frente al ácido sulfhídrico medido en atmósfera para el punto de La Venta, resulta tener cierta disminución repentina de la curva antes de lo deseado (Figura 40), mientras que en el caso de Zarandona el comportamiento general es correcto (Figura 42).

5.5.2 Análisis estadístico

Tabla 24. Matriz de correlaciones bivariadas para La Venta. Modelo Lahav.

	Tatm	Tagua	Caudal	Calado	Uagua	Vol	TRH	DBO ₅	[S] _{aq}	[S] _{atm}	[S] _{suav}
Tatm	1.00	-0.24	-0.40	-0.41	-0.44	-0.41	0.23	-0.33	-0.11	-0.11	0.38
Tagua	-0.24	1.00	0.35	0.34	0.35	0.34	-0.88	0.90	0.90	0.90	0.39
Caudal	-0.40	0.35	1.00	1.00	0.98	1.00	0.02	0.39	0.54	0.54	-0.32
Calado	-0.41	0.34	1.00	1.00	0.99	1.00	0.02	0.38	0.52	0.52	-0.33
Uagua	-0.44	0.35	0.98	0.99	1.00	0.98	0.00	0.38	0.51	0.51	-0.34
Vol	-0.41	0.34	1.00	1.00	0.98	1.00	0.01	0.38	0.52	0.52	-0.32
TRH	0.23	-0.88	0.02	0.02	0.00	0.01	1.00	-0.76	-0.64	-0.64	-0.51
DBO ₅	-0.33	0.90	0.39	0.38	0.38	0.38	-0.76	1.00	0.84	0.84	0.15
[S] _{aq}	-0.11	0.90	0.54	0.52	0.51	0.52	-0.64	0.84	1.00	1.00	0.30
[S] _{atm}	-0.11	0.90	0.54	0.52	0.51	0.52	-0.64	0.84	1.00	1.00	0.30
[S] _{suav}	0.38	0.39	-0.32	-0.33	-0.34	-0.32	-0.51	0.15	0.30	0.30	1.00

Tabla 25. Matriz de correlaciones bivariadas para Zarandona. Modelo Lahav.

	Tatm	Tagua	Caudal	Calado	Uagua	Vol	TRH	DBO ₅	[S] _{aq}	[S] _{atm}	[S] _{suav}
Tatm	1.00	0.72	0.39	0.40	0.42	0.37	-0.59	0.63	0.44	0.51	0.10
Tagua	0.72	1.00	0.80	0.80	0.81	0.78	-0.88	0.90	0.87	0.92	0.57
Caudal	0.39	0.80	1.00	1.00	0.98	0.99	-0.93	0.73	0.76	0.86	0.66
Calado	0.40	0.80	1.00	1.00	0.98	0.99	-0.93	0.73	0.78	0.87	0.67
Uagua	0.42	0.81	0.98	0.98	1.00	0.98	-0.91	0.75	0.77	0.86	0.65
Vol	0.37	0.78	0.99	0.99	0.98	1.00	-0.92	0.71	0.77	0.86	0.67
TRH	-0.59	-0.88	-0.93	-0.93	-0.91	-0.92	1.00	-0.76	-0.74	-0.86	-0.56
DBO ₅	0.63	0.90	0.73	0.73	0.75	0.71	-0.76	1.00	0.72	0.79	0.45
[S] _{aq}	0.44	0.87	0.76	0.78	0.77	0.77	-0.74	0.72	1.00	0.98	0.83
[S] _{atm}	0.51	0.92	0.86	0.87	0.86	0.86	-0.86	0.79	0.98	1.00	0.79
[S] _{suav}	0.10	0.57	0.66	0.67	0.65	0.67	-0.56	0.45	0.83	0.79	1.00

Atendiendo ahora al análisis estadístico, en la Tabla 24 y Tabla 25 se presentan las correlaciones bivariadas de Pearson. Los valores obtenidos son similares a los encontrados en el modelo base.

En cuanto al análisis de componentes principales, varianza del conjunto de datos de La Venta queda explicada en un 93.33% a través de tres componentes (54.39%, 29.28% y 9.66% respectivamente), Zarandona consigue explicar un 88.94% por medio de 2 componentes (78.45% y 10.49%) (Tabla 26 y Tabla 27).

Tabla 26. Matriz de varianza total explicada y extracción de componentes principales para La Venta. Modelo Lahav.

Componente	Autovalores iniciales			Sumas de extracción de cargas al cuadrado		
	Total	% de varianza	% acumulado	Total	% de varianza	% acumulado
1	5.98	54.39	54.39	5.98	54.39	54.39
2	3.22	29.28	83.67	3.22	29.28	83.67
3	1.06	9.66	93.33	1.06	9.66	93.33
4	0.45	4.11	97.44			
5	0.14	1.26	98.71			
6	0.10	0.88	99.59			
7	0.03	0.24	99.82			
8	0.01	0.13	99.95			
9	0.00	0.03	99.99			
10	0.00	0.01	100.00			
11	0.00	0.00	100.00			



Tabla 27. Matriz de varianza total explicada y extracción de componentes principale para Zarandona. Modelo Lahav

Componente	Autovalores iniciales			Sumas de extracción de cargas al cuadrado		
	Total	% de varianza	% acumulado	Total	% de varianza	% acumulado
1	8.63	78.45	78.45	8.63	78.45	78.45
2	1.15	10.49	88.94	1.15	10.49	88.94
3	0.71	6.48	95.42			
4	0.26	2.41	97.82			
5	0.12	1.06	98.88			
6	0.07	0.68	99.56			
7	0.02	0.23	99.79			
8	0.01	0.12	99.91			
9	0.01	0.05	99.96			
10	0.00	0.03	99.99			
11	0.00	0.01	100.00			

La Tabla 28 muestra la matriz de correlación de los componentes con las variables que involucran para el punto de La Venta. El componente 1 contiene los resultados de la simulación, el segundo componente recoge la relación entre el *TRH* y $[S]_{suav}$, y finalmente el componente 3 aísla la temperatura de la atmósfera del colector de resto de variables.

Tabla 28. Matriz de correlación entre variables y componentes principales para La Venta. Modelo Lahav.

	Componentes principales		
	1	2	3
Tatm	-.428		.801
Tagua	.799	-.577	
Caudal	.832	.524	
Calado	.828	.532	
Uagua	.826	.530	
Vol	.829	.529	
TRH	-.498	.766	.303
DBO₅	.797	-.435	
[S]aq	.875	-.395	
[S]atm	.875	-.395	
[S]suav		-.775	.364

Para el caso de Zarandona, los resultados de correlaciones componentes-variables se recogen en la Tabla 29. El componente 1 abarca todo el proceso salvo la variable T_{atm} , que queda mejor reflejada en el componente 2. Este análisis no muestra suficiente detalle en forma de componentes para dejar claro las variables a utilizar en la regresión del ácido sulfhídrico medido y suavizado por media móvil, $[S]_{suav}$.

Tabla 29. Matriz de correlación entre variables y componentes principales para Zarandona. Modelo Lahav.

	Componentes principales	
	1	2
Tatm	.555	.776
Tagua	.929	
Caudal	.951	
Calado	.957	
Uagua	.952	
Vol	.945	
TRH	-.941	
DBO₅	.840	.329
[S]_{aq}	.893	
[S]_{atm}	.962	
[S]_{suav}	.723	-.491

5.5.3 Regresión

Las variables finalmente elegidas para la regresión coinciden con las seleccionadas en modelos anteriores: proporción de volumen ocupado por el agua residual, *Vol*, el tiempo de retención hidráulico, *TRH*, la demanda química de oxígeno, *DQO*, y el sulfuro disuelto simulado en el agua residual, $[S]_{aq}$. A continuación, se presentan las regresiones propuestas.

$$[S]_{atm_{Reg.Venta.Lahav}} = -260.644 \cdot Vol - 12.331 \cdot TRH - 0.181 \cdot DBO_5 + 1.213 \cdot [S]_{aq} + 186.009 \quad (5.7)$$

$$[S]_{atm_{Reg.Zarand.Lahav}} = 190.787 \cdot Vol + 2.717 \cdot TRH - 0.022 \cdot DBO_5 + 17.868 \cdot [S]_{aq} - 28.458 \quad (5.8)$$

El valor de R^2 obtenido para La Venta es de 0.59 y para Zarandona de 0.77. En la Figura 43 y Figura 44 se grafican las curvas correspondientes a las regresiones propuestas junto a los valores medidos en la atmósfera del colector y su curva suavizada.

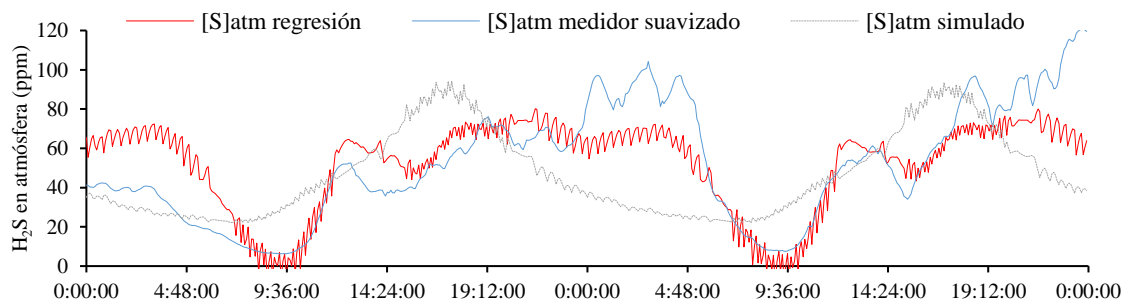


Figura 43. H₂S en atmósfera de conducción simulado con modelo de Lahav, ajustado por regresión lineal y medido suavizado con media móvil. La Venta.

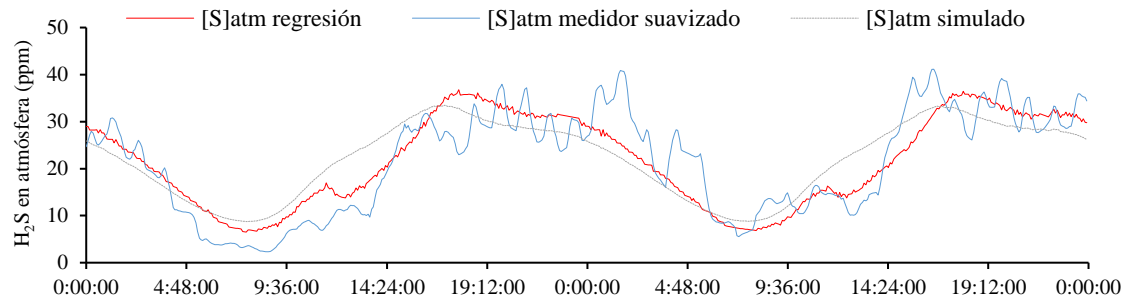


Figura 44. H_2S en atmósfera de conducción simulado con modelo de Lahav, ajustado por regresión lineal y medido suavizado con media móvil. Zarandona.

5.6 MODELO DE A. H. NIELSEN ET AL. (2005)

5.6.1 Simulación

En la siguiente tabla se muestran los valores empleados en cada punto estudiado para alguna de las variables empleadas en el modelo empírico.

Tabla 30. Valores adoptados para las variables simuladas en Zarandona y La Venta. Modelo Nielsen.

	So	f'	α	$k_{s(-II),p}$	$K_L a_{H_2S}$	s	Diámetro	fp
	(mg/L)	(-)	(-)	(gS (gCOD) ^{-0.5} m ⁻² h ⁻¹)	(h ⁻¹)	(m/m)	(m)	(-)
La Venta	0	0.5	0.6	0.08	0.09 - 0.21	0.002	2.0	0.96 - 1.00
Zarandona	0	0.5	0.6	0.04	0.09 - 0.15	0.002	2.8	0.99 - 1.00

La variable $k_{s(-II),p}$ adquiere valores superiores a los establecidos por los autores para poder ajustar el modelo a los datos de la campaña de campo, La Venta posee un valor superior debido al mayor tiempo de retención hidráulica o a un mayor desarrollo del biofilm. El coeficiente de transferencia, $K_L a_{H_2S}$ en este caso, adquiere los mismos valores que en el caso del modelo de C. Yongsiri, ya que se obtiene de igual forma.

La simulación expresada de forma gráfica se recoge a continuación. En el caso de la simulación de sulfuros disueltos, tal y como ocurre el resto de modelos, no se pudo asegurar un buen ajuste de los datos al tener muestreos sólo en unas horas al día.

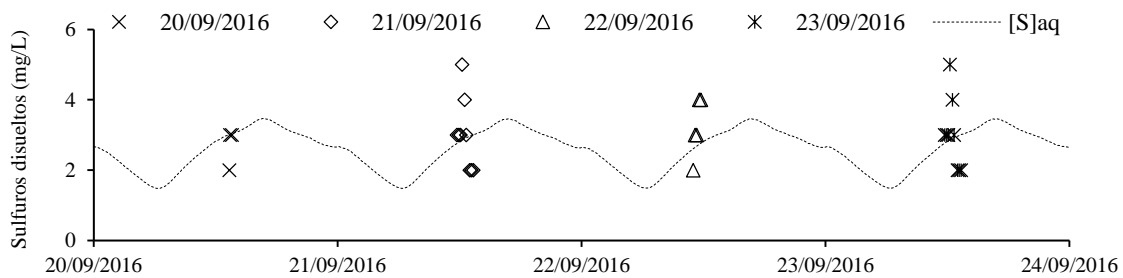


Figura 45. Simulación de sulfuros disueltos junto a valores puntuales de La Venta. Modelo Nielsen.

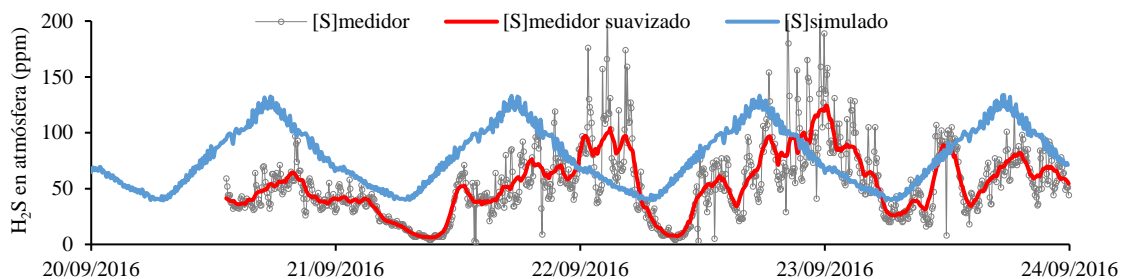


Figura 46. Simulación de ácido sulfhídrico en atmósfera de la conducción de La Venta. Modelo Nielsen.

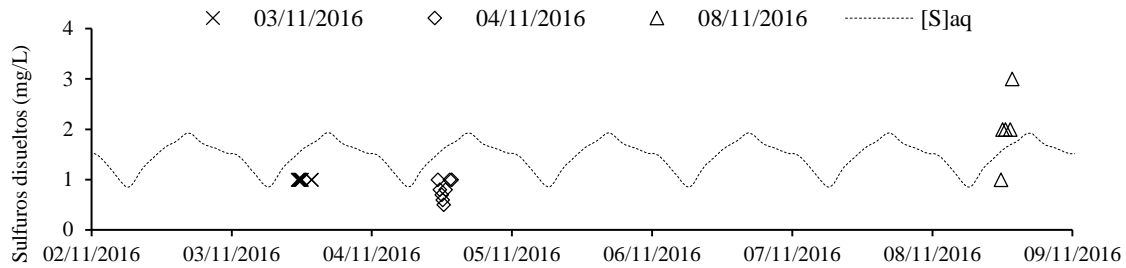


Figura 47. Simulación de sulfuros disueltos junto a valores puntuales de Zarandona. Modelo Nielsen.

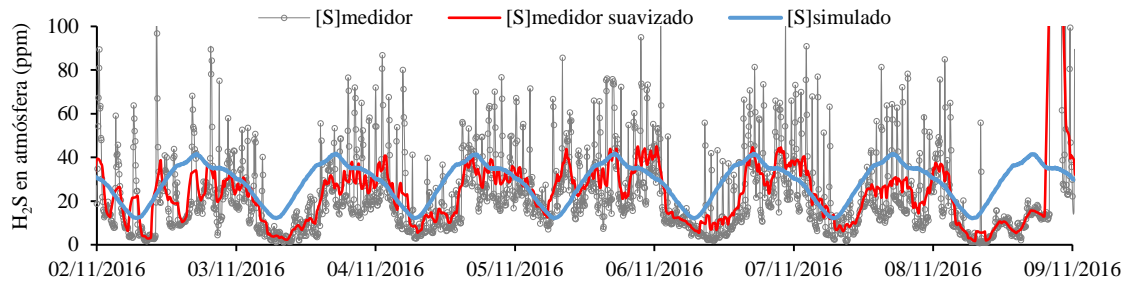


Figura 48. Simulación de ácido sulfhídrico en atmósfera de la conducción de Zarandona. Modelo Nielsen.

La simulación de sulfhídrico en la atmósfera de la conducción arroja un desfase entre lo simulado y lo medido para La Venta (Figura 47) y una tendencia aceptable en el caso de Zarandona (Figura 48).

5.6.2 Análisis estadístico

Los resultados de las correlaciones bivariadas de Pearson para los puntos estudiados se presentan en la Tabla 31 y la Tabla 32.

Tabla 31. Matriz de correlaciones bivariadas para La Venta. Modelo Nielsen.

	Tatm	Tagua	Caudal	Calado	Uagua	Vol	TRH	S _F +S _A +X _{S1}	[S] _{aq}	[S] _{atm}	[S] _{suav}
Tatm	1.00	-0.24	-0.40	-0.41	-0.44	-0.41	0.23	-0.40	-0.18	-0.14	0.38
Tagua	-0.24	1.00	0.35	0.34	0.35	0.34	-0.88	0.90	0.97	0.96	0.39
Caudal	-0.40	0.35	1.00	1.00	0.98	1.00	0.02	0.44	0.31	0.48	-0.32
Calado	-0.41	0.34	1.00	1.00	0.99	1.00	0.02	0.43	0.30	0.46	-0.33
Uagua	-0.44	0.35	0.98	0.99	1.00	0.98	0.00	0.44	0.30	0.46	-0.34
Vol	-0.41	0.34	1.00	1.00	0.98	1.00	0.01	0.44	0.30	0.47	-0.32
TRH	0.23	-0.88	0.02	0.02	0.00	0.01	1.00	-0.76	-0.84	-0.74	-0.51
DQO	-0.40	0.90	0.44	0.43	0.44	0.44	-0.76	1.00	0.93	0.86	0.12
[S] _{aq}	-0.18	0.97	0.31	0.30	0.30	0.30	-0.84	0.93	1.00	0.96	0.38
[S] _{atm}	-0.14	0.96	0.48	0.46	0.46	0.47	-0.74	0.86	0.96	1.00	0.37
[S] _{suav}	0.38	0.39	-0.32	-0.33	-0.34	-0.32	-0.51	0.12	0.38	0.37	1.00

Tabla 32. Matriz de correlaciones bivariadas para Zarandona. Modelo Nielsen.

	Tatm	Tagua	Caudal	Calado	Uagua	Vol	TRH	$S_F+S_A+X_{SI}$	[S] _{aq}	[S] _{atm}	[S] _{suav}
Tatm	1.00	0.72	0.39	0.40	0.42	0.37	-0.59	0.68	0.63	0.60	0.10
Tagua	0.72	1.00	0.80	0.80	0.81	0.78	-0.88	0.90	0.95	0.96	0.57
Caudal	0.39	0.80	1.00	1.00	0.98	0.99	-0.93	0.70	0.82	0.87	0.66
Calado	0.40	0.80	1.00	1.00	0.98	0.99	-0.93	0.71	0.83	0.88	0.67
Uagua	0.42	0.81	0.98	0.98	1.00	0.98	-0.91	0.73	0.85	0.88	0.65
Vol	0.37	0.78	0.99	0.99	0.98	1.00	-0.92	0.68	0.81	0.86	0.67
TRH	-0.59	-0.88	-0.93	-0.93	-0.91	-0.92	1.00	-0.76	-0.84	-0.88	-0.56
DQO	0.68	0.90	0.70	0.71	0.73	0.68	-0.76	1.00	0.94	0.85	0.40
[S] _{aq}	0.63	0.95	0.82	0.83	0.85	0.81	-0.84	0.94	1.00	0.97	0.61
[S] _{atm}	0.60	0.96	0.87	0.88	0.88	0.86	-0.88	0.85	0.97	1.00	0.71
[S] _{suav}	0.10	0.57	0.66	0.67	0.65	0.67	-0.56	0.40	0.61	0.71	1.00

Se vuelve a encontrar las correlaciones de -0.51 entre $[S]_{suav}$ y TRH para La Venta y 0.67 entre $[S]_{suav}$ y Vol en Zarandona, debido a que estas variables son iguales en todos los conjuntos de datos de los modelos empíricos, como ya se ha explicado. Además, la carga orgánica, $S_F+S_A+X_{SI}$, obtiene valores de correlación similar a los modelos de A. G. Boon y A. R. Lister junto a S. Elmaleh et al.

En cuanto al análisis de componentes principales, la Tabla 33 y Tabla 34 recogen la extracción de los componentes de cada punto de estudio.

Tabla 33. Matriz de varianza total explicada y extracción de componentes principales para La Venta. Modelo Nielsen.

Componente	Autovalores iniciales			Sumas de extracción de cargas al cuadrado		
	Total	% de varianza	% acumulado	Total	% de varianza	% acumulado
1	5.89	53.57	53.57	5.89	53.57	53.57
2	3.45	31.40	84.97	3.45	31.40	84.97
3	1.01	9.21	94.18	1.01	9.21	94.18
4	0.42	3.80	97.98			
5	0.11	0.98	98.96			
6	0.07	0.64	99.60			
7	0.03	0.24	99.84			
8	0.01	0.10	99.93			
9	0.00	0.03	99.96			
10	0.00	0.02	99.99			
11	0.00	0.01	100.00			



Tabla 34. Matriz de varianza total explicada y extracción de componentes principale para Zarandona. Modelo Nielsen.

Componente	Autovalores iniciales			Sumas de extracción de cargas al cuadrado		
	Total	% de varianza	% acumulado	Total	% de varianza	% acumulado
1	8.76	79.59	79.59	8.76	79.59	79.59
2	1.23	11.19	90.79	1.23	11.19	90.79
3	0.53	4.82	95.61			
4	0.29	2.66	98.27			
5	0.09	0.78	99.05			
6	0.06	0.51	99.56			
7	0.02	0.18	99.75			
8	0.02	0.17	99.91			
9	0.01	0.05	99.96			
10	0.00	0.02	99.99			
11	0.00	0.01	100.00			

Para el caso de La Venta se obtienen tres componentes, el primero explica un 53.57% de la varianza total, el segundo un 31.4% y el tercero un 9.21%, sumando un total de 97.18% explicado. En Zarandona se han extraído dos componentes que suman un 90.79% de la varianza total explicada (79.59% y 11.19% respectivamente).

La Tabla 35 contiene la correlación componente-variable para el punto de La Venta, donde el primer componente parece recoger el grueso de la simulación, el segundo muestra la conexión $TRH-[S]_{suav}$ y en el tercero se agrupa T_{atm} . Para el punto de Zarandona es el segundo componente el que recoge a T_{atm} , dejando el resto del proceso al componente 1 (Tabla 36).

Tabla 35. Matriz de correlación entre variables y componentes principales para La Venta. Modelo Nielsen.

	Componentes principales		
	1	2	3
Tatm	-0.457		0.773
Tagua	0.842	-0.519	
Caudal	0.783	0.589	
Calado	0.781	0.597	
Uagua	0.781	0.593	
Vol	0.782	0.594	
TRH	-0.576	0.742	
S_F+S_A+X_{S1}	0.871	-0.335	
[S]aq	0.817	-0.544	
[S]atm	0.878	-0.405	
[S]suav		-0.758	0.435

Tabla 36. Matriz de correlación entre variables y componentes principales para Zarandona. Modelo Nielsen.

	Componentes principales	
	1	2
Tatm	0.589	0.728
Tagua	0.939	
Caudal	0.947	
Calado	0.953	
Uagua	0.953	
Vol	0.940	
TRH	-0.948	
S_F+S_A+X_{S1}	0.855	0.378
[S]_{aq}	0.949	
[S]_{atm}	0.971	
[S]_{suav}	0.676	-0.471

El análisis de componentes principales no deja claro del todo las relaciones fundamentales de la variable que se quiere predecir, $[S]_{suav}$, con el resto.

5.6.3 Regresión

A la vista de los resultados obtenidos en el apartado anterior, se proponen dos ecuaciones de regresión, (5.9) y (5.10), una para cada punto estudiado. Las variables empleadas coinciden con las del resto de casos: proporción de volumen ocupado por el agua residual, Vol , el tiempo de retención hidráulico, TRH , la demanda química de oxígeno, DQO , y el sulfuro disuelto simulado en el agua residual, $[S]_{aq}$.

$$[S]_{atm_{Reg.Venta.Nielsen}} = -52.638 \cdot Vol - 9.512 \cdot TRH - 0.206 \cdot (S_F + S_A + X_{S1}) + 73.379 \cdot [S]_{aq} + 50.357 \quad (5.9)$$

$$[S]_{atm_{Reg.Zarand.Nielsen}} = 127.182 \cdot Vol + 1.837 \cdot TRH - 0.071 \cdot (S_F + S_A + X_{S1}) + 67.813 \cdot [S]_{aq} - 59.398 \quad (5.10)$$

Los coeficientes de determinación obtenidos son de $R^2 = 0.63$ y $R^2 = 0.68$, para La Venta y Zarandona respectivamente. En la Figura 49 y Figura 50 se grafican estas regresiones junto a los valores medidos.

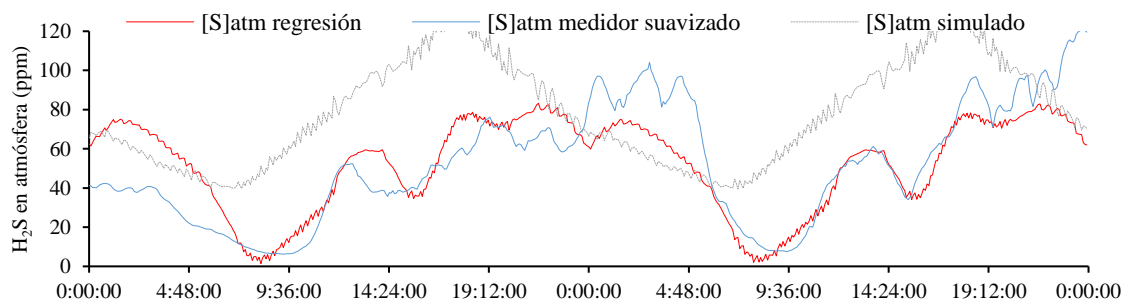


Figura 49. H₂S en atmósfera de conducción simulado con modelo de Nielsen, ajustado por regresión lineal y medido suavizado con media móvil. La Venta.

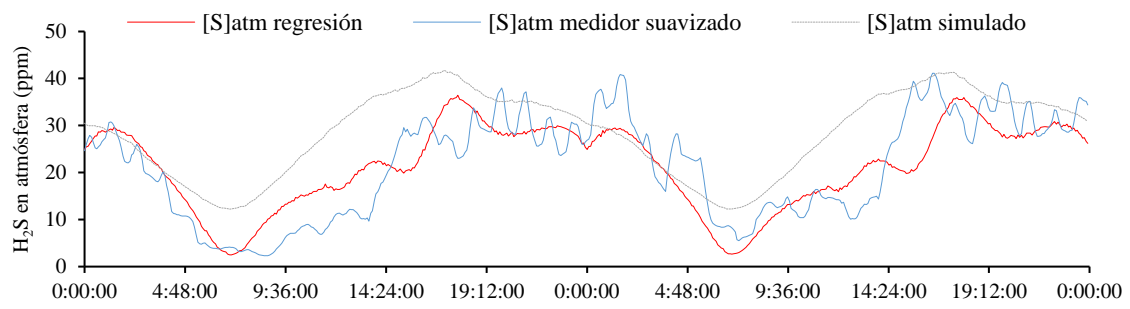


Figura 50. H₂S en atmósfera de conducción simulado con modelo de Nielsen, ajustado por regresión lineal y medido suavizado con media móvil. Zarandona.

5.7 COMPARACIÓN DE MODELOS

Una vez planteados los resultados de los modelos empíricos recogidos en este trabajo, se procede a realizar una comparativa de los coeficientes de determinación obtenidos para comprobar el modelo empírico que mejor ajusta sus regresiones a los datos recogidos durante la campaña de campo.

Tabla 37. Comparación de valores de R^2 para los dos puntos estudiados y según modelo empírico.

Modelo	Coeficiente de determinación R^2	
	La Venta	Zarandona
J. S. Matos y E. R. de Sousa (1992)	0.72	0.84
A. G. Boon y A. R. Lister (1975)	0.60	0.84
S. Elmaleh et al (1998)	0.64	0.82
C. Yongsiri et al(2004)	-	-
O. Lahav et al(2004)	0.59	0.77
A. H. Nielsen et al (2005)	0.63	0.68

Según la Tabla 37, el modelo que mejor se ajusta a los datos estudiados es el modelo base, o de J. S. Matos y E. R. de Sousa. Siendo el punto de Zarandona el que mejor se ajusta, dentro y fuera de este modelo empírico.

El modelo de C. Yongsiri et al. no contiene valores de coeficiente de determinación ya que no se le ejecutó análisis estadístico o regresión, al no simular de forma concordante con los datos medidos en campo.

En la Figura 51 y Figura 52 se grafican todas las correlaciones obtenidas junto a los datos de la medición de sulfhídrico suavizada por media móvil, para los puntos de La Venta y Zarandona.

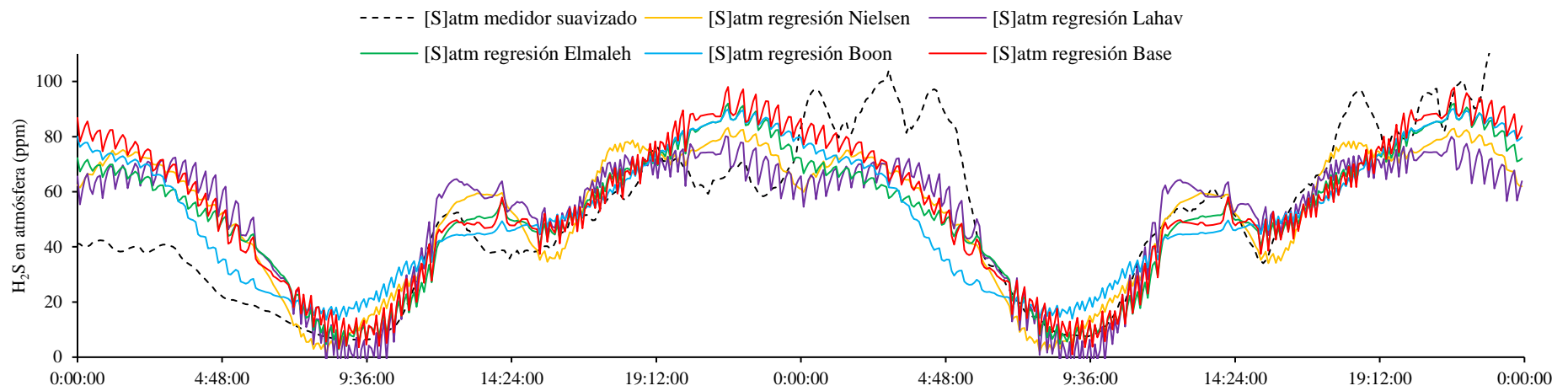


Figura 51. Gráfico con el conjunto de regresiones válidas sobre la medición en atmósfera del colector suavizada con media móvil de 20 valores. La Venta.

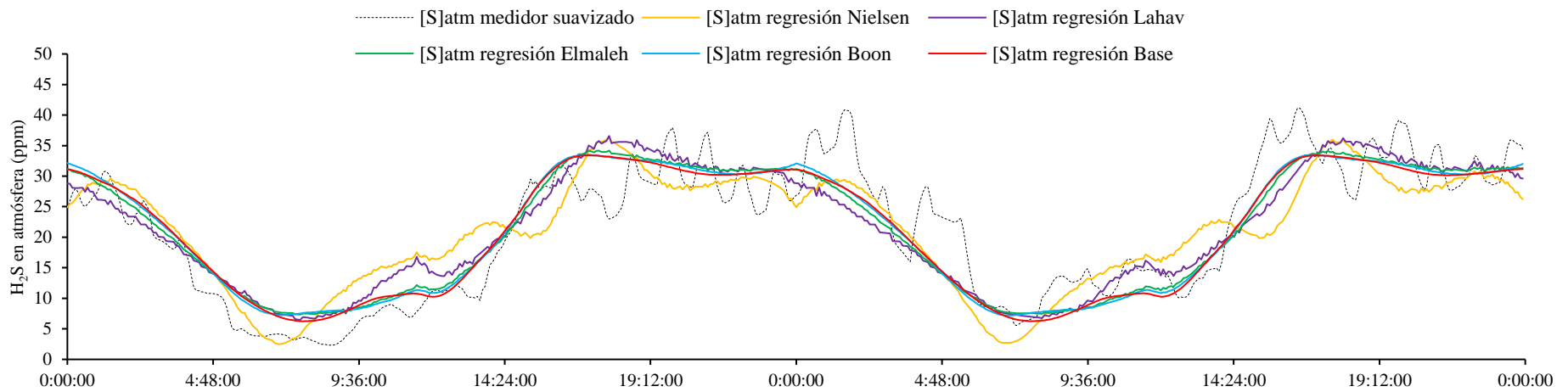


Figura 52. Gráfico con el conjunto de regresiones válidas sobre la medición en atmósfera del colector suavizada con media móvil de 20 valores. Zarandona



5.8 ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD

En el presente apartado se analiza cómo de sensible es cada una de las regresiones lineales múltiples del modelo con mejor coeficiente de determinación según el apartado anterior (modelo de J. S. Matos y E. R. de Sousa), definidas según las ecuaciones (5.1) y (5.2), frente a la variación de una de las variables que intervienen en dichas regresiones. Para ello se ha utilizado un índice de sensibilidad, IS , que tiene la siguiente forma:

$$IS = \frac{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left(\frac{[S]_{regresión_Xi} - [S]_{suav}}{[S]_{suav}} \right)}{\frac{X_i - \bar{X}}{\bar{X}}} \quad (5.11)$$

Donde:

- X_i es el valor adoptado por la variable sobre la que se estudia la sensibilidad. En este trabajo se han utilizado los valores máximos y mínimos de las variables medidas.
- \bar{X} es la media de los valores adoptados por la variable en cuestión.
- N es el número de valores para los que se calcula el índice, total de 288 valores que comprenden los intervalos de 5 minutos de un periodo de 24 horas.
- $[S]_{regresión_Xi}$ es el valor de sulfhídrico en atmósfera calculado mediante la regresión propuesta una vez se fija el valor de X_i .

Dicho índice de sensibilidad se ha calculado para cada una de las variables que conforman la regresión. En la siguiente tabla se presentan los valores mínimos, máximos y medios de cada variable para el punto de estudio de La Venta.

Tabla 38. Valores mínimos, máximos y medios adoptados por las variables utilizadas en la regresión de La Venta.

	Vol (%)	TRH (h)	DBO ₅ (mg/L)	[S]aq (mg/L)
Min	7.21	4.30	108.22	2.24
Media	18.20	6.45	352.55	4.87
Max	27.59	8.99	625.69	7.62

Tabla 39. Índice de sensibilidad, IS , obtenido para los valores mínimo y máximo de las variables de la regresión en La Venta.

	Vol (%)	TRH (h)	DBO ₅ (mg/L)	[S]aq (mg/L)
IS_{Min}	0.31	0.55	0.27	0.34
IS_{Max}	-0.36	-0.47	-0.24	-0.33



Los valores de la Tabla 39 muestran que, en el caso de La Venta, confirma una sensibilidad elevada respecto a la variable tiempo de retención hidráulico, TRH . De igual modo, los sulfuros en el agua residual, $[S]_{aq}$, y la proporción de volumen llenado, Vol , son variables que influyen en los valores de la regresión. La variable DBO_5 ofrece la menor sensibilidad tras su variación.

En la Tabla 40 se muestran los valores mínimos, máximos y medios para el punto de Zarandona.

Tabla 40. Valores mínimos, medios y máximos adoptados por las variables utilizadas en la regresión de Zarandona.

	Vol (%)	TRH (h)	DBO₅ (mg/L)	[S]_{aq} (mg/L)
Min	5.20	2.30	108.22	1.44
Media	10.46	4.45	352.55	3.13
Max	14.60	6.99	625.69	4.27

Tabla 41. Índice de sensibilidad, IS, obtenido para los valores mínimo y máximo de las variables de la regresión en Zarandona.

	Vol (%)	TRH (h)	DBO₅ (mg/L)	[S]_{aq} (mg/L)
IS_{Min}	0.20	0.21	0.15	0.19
IS_{Max}	-0.26	-0.18	-0.13	-0.28

Tal y como aparece en la Tabla 41, en el caso de Zarandona la regresión presenta la sensibilidad más elevada respecto a la variable sulfuros en el agua residual, $[S]_{aq}$, por lo que se deberá prestar especial atención a la determinación de esta variable. Como variable que presenta una menor sensibilidad se observa de nuevo la demanda biológica de oxígeno a los cinco días, DBO_5 .



6 CONCLUSIONES

Tras la simulación y estudio estadístico de los distintos modelos empíricos recogidos en este trabajo, se puede concluir que:

1. De los seis modelos empíricos aplicados tan sólo uno no ha resultado ser apto para predecir, de forma más o menos fiel, el nivel de ácido sulfhídrico en la atmósfera de las conducciones situadas en los puntos estudiados.
2. El modelo que mejor se ha comportado ha sido el de J. S. Matos y E. R. de Sousa (1992), logrando una regresión del ácido sulfhídrico en atmósfera con coeficientes de determinación de 0.72 en La Venta y 0.84 en Zarandona.
3. El punto de estudio de Zarandona ha sido el mejor ajustado en todos los modelos estudiados.
4. El punto de estudio de La Venta ha obtenido en todos los modelos un valor mayor de la correspondiente constante de generación, la razón es un desarrollo del biofilm superior al punto Zarandona y un mayor tiempo de retención hidráulico que facilita la hidrólisis de materia orgánica.
5. El análisis de componentes principales no ha arrojado demasiada luz sobre las variables clave a las que recurrir para realizar la regresión, pero se aprecian comportamientos definidos como la aparición de la temperatura del aire del colector en el último factor extraído, mostrando la débil relación entre esta variable y el resto. Los datos de temperatura en atmósfera presentes en los puntos estudiados no varían lo suficiente como para conllevar grandes cambios de concentración de sulfhídrico.
6. En cuanto al análisis de sensibilidad, se desprende que, si bien hay ciertas variables que hacen que los resultados sean más sensibles a su variación, ninguna de ellas es despreciable y todas se deben cuantificar de forma adecuada para que la regresión lineal se aproxime a los valores medidos en campo.
7. Pese a que los resultados arrojen una correcta aproximación del fenómeno, se ha simulado de forma simplificada, sin considerar por ejemplo un modelo de transporte de aire acoplado. Además, en relación de la fase acuosa se descubre la necesidad de tener muestreos más continuados para mejorar el ajuste. Por lo que quedan abiertas futuras líneas de investigación.



7 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Agency for Toxic Substances and Disease Registry (ATSDR), 2015. Public Health Statement: Hydrogen Sulfide Carbonyl Sulfide [WWW Document]. URL <https://www.atsdr.cdc.gov/PHS/PHS.asp?id=387&tid=67> (accessed 12.14.17).
- ASCE, 1989. Sulfide in Wastewater Collection and Treatment Systems, Manual of Practice. American Society of Civil Engineers, NY.
- Boon, A., Lister, A., 1975. Formation of sulphide in rising main sewers and its prevention by injection of oxygen. *Prog Wat Tech* 7, 289–300.
- Carrera, L., Springer, F., Lipeme-Kouyi, G., Buffiere, P., 2016. A review of sulfide emissions in sewer networks: overall approach and systemic modelling. *Water Sci. Technol.* 73, 1231–1242. <https://doi.org/10.2166/wst.2015.622>
- Donckels, B.M.R., Kroll, S., Dorpe, M.V., Weemaes, M., 2014. Global sensitivity analysis of an in-sewer process model for the study of sulfide-induced corrosion of concrete. *Water Sci. Technol.* 69, 647–655. <https://doi.org/10.2166/wst.2013.763>
- Elmaleh, S., Delgado, S., Alvarez, M., Rodríguez-Gómez, L.E., Aguiar, E., 1998. Forecasting of H₂S build-up in a reclaimed wastewater pipe. *Water Sci. Technol., Water Quality International '98* 38, 241–248. [https://doi.org/10.1016/S0273-1223\(98\)00755-0](https://doi.org/10.1016/S0273-1223(98)00755-0)
- Espín Leal, P., 2016. Estudio de los flujos de contaminación transportados por un sistema de saneamiento y drenaje unitario en tiempo de lluvia para la ciudad de Murcia. Universidad Politécnica de Cartagena (UPCT), Cartagena.
- García, J.T., Espín-Leal, P., Viguera-Rodríguez, A., Castillo, L.G., Carrillo, J.M., Martínez-Solano, P.D., Nevado-Santos, S., 2017a. Urban Runoff Characteristics in Combined Sewer Overflows (CSOs): Analysis of Storm Events in Southeastern Spain. *Water* 9, 303. <https://doi.org/10.3390/w9050303>
- García, J.T., Viguera-Rodríguez, A., Castillo, L.G., Carrillo, J.M., 2017b. Evaluation of Sulfide Control by Air-Injection in Sewer Force Mains: Field and Laboratory Study. *Sustainability* 9, 402. <https://doi.org/10.3390/su9030402>
- Gazzaz, N.M., Yusoff, M.K., Ramli, M.F., Aris, A.Z., Juahir, H., 2012. Characterization of spatial patterns in river water quality using chemometric pattern recognition techniques. *Mar. Pollut. Bull.* 64, 688–698. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2012.01.032>
- Gutierrez, O., Park, D., Sharma, K.R., Yuan, Z., 2009. Effects of long-term pH elevation on the sulfate-reducing and methanogenic activities of anaerobic sewer biofilms. *Water Res.* 43, 2549–2557. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2009.03.008>
- Hall, J.W., Boyce Shawn A., Wang Yueling, Dawson Richard J., Tarantola Stefano, Saltelli Andrea, 2009. Sensitivity Analysis for Hydraulic Models. *J. Hydraul. Eng.* 135, 959–969. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HY.1943-7900.0000098](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0000098)
- Hvitved-Jacobsen, T., Vollertsen, J., Nielsen, A.H., 2013. Sewer Processes: Microbial and Chemical Process Engineering of Sewer Networks, Second Edition. CRC Press.
- Hvitved-Jacobsen, T., Vollertsen, J., Nielsen, P.H., 1998. A process and model concept for microbial wastewater transformations in gravity sewers. *Water Sci.*

- Technol., *The Sewer as a Physical, Chemical and Biological Reactor II* 37, 233–241. [https://doi.org/10.1016/S0273-1223\(97\)00774-9](https://doi.org/10.1016/S0273-1223(97)00774-9)
- Johnson, R.A., Wichern, D.W., 2007. *Applied Multivariate Statistical Analysis*. Pearson Prentice Hall.
- Lahav, O., Lu, Y., Shavit, U., Loewenthal, R.E., 2004. Modeling Hydrogen Sulfide Emission Rates in Gravity Sewage Collection Systems. *J. Environ. Eng.* 130, 1382–1389. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9372\(2004\)130:11\(1382\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9372(2004)130:11(1382))
- Matos, J.S., de Sousa, E.R., 1992. The Forecasting of Hydrogen Sulphide Gas Build-Up in Sewerage Collection Systems. *Water Sci. Technol.* 26, 915–922.
- Medina-Moral, E., 2005. *Curso de introducción y manejo básico del SPSS. Sesión II*. Facultad de Ciencias Económicas y Empresariales. Universidad Autónoma de Madrid.
- Nielsen, A.H., Vollertsen, J., Jensen, H.S., Madsen, H.I., Hvitved-Jacobsen, T., 2008. Aerobic and Anaerobic Transformations of Sulfide in a Sewer System—Field Study and Model Simulations. *Water Environ. Res.* 80, 16–25. <https://doi.org/10.2175/106143007X184537>
- Nielsen, A.H., Yongsiri, C., Hvitved-Jacobsen, T., Vollertsen, J., 2005. Simulation of sulfide buildup in wastewater and atmosphere of sewer networks. *Water Sci. Technol. J. Int. Assoc. Water Pollut. Res.* 52, 201–8.
- Nielsen, P.H., Hvitved-Jacobsen, T., 1988. Effect of Sulfate and Organic Matter on the Hydrogen Sulfide Formation in Biofilms of Filled Sanitary Sewers. *J. Water Pollut. Control Fed.* 60, 627–634.
- Nielsen, P.H., Raunkjær, K., Hvitved-Jacobsen, T., 1998. Sulfide production and wastewater quality in pressure mains. *Water Sci. Technol.* 37, 97–104.
- Pardo, A., Merino, A.P., 2002. *SPSS 11: guía para el análisis de datos*. McGraw-Hill.
- Pomeroy, R.D., Parkhurst, J.D., 1978. THE FORECASTING OF SULFIDE BUILD-UP RATES IN SEWERS, in: Jenkins, S.H. (Ed.), *Eighth International Conference on Water Pollution Research*. Pergamon, pp. 621–628. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-020902-9.50083-3>
- Rincón, L., 2012. *Introducción a los procesos estocásticos*. Departamento de Matemáticas. Facultad de Ciencias. Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM).
- Sand, W., Bock, E., White, D.C., 1987. Biotest System for Rapid Evaluation of Concrete Resistance to Sulfur-Oxidizing Bacteria. *Mater. Perform.* 26, 14–17.
- Santry, I.W., 1963. Hydrogen Sulfide in Sewers. *J. Water Pollut. Control Fed.* 35, 1580–1588.
- U.S. EPA, 2015. *Storm Water Management Model User’s Manual Version 5.1*. U.S. Environmental Protection Agency.
- U.S. EPA, 1985. *Design Manual Odor and Corrosion Control in Sanitary Sewerage Systems and Treatment Plants*. U.S. Environmental Protection Agency.
- U.S. EPA, 1979. *Methods for Chemical Analysis of Water and Wastes*. U.S. Environmental Protection Agency.
- Vollertsen, J., Nielsen, L., Blicher, T.D., Hvitved-Jacobsen, T., Nielsen, A.H., 2011. A sewer process model as planning and management tool – hydrogen sulfide simulation at catchment scale. *Water Sci. Technol.* 64, 348–354. <https://doi.org/10.2166/wst.2011.717>
- Yongsiri, C., Vollertsen, J., Hvitved-Jacobsen, T., 2005. Influence of Wastewater Constituents on Hydrogen Sulfide Emission in Sewer Networks. *J. Environ.*



- Eng. 131, 1676–1683. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9372\(2005\)131:12\(1676\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9372(2005)131:12(1676))
- Yongsiri, C., Vollertsen, J., Hvitved-Jacobsen, T., 2004. Hydrogen sulfide emission in sewer networks: a two-phase modeling approach to the sulfur cycle. *Water Sci. Technol.* 50, 161–168.
- Yongsiri, C., Vollertsen, J., Hvitved-Jacobsen, T., 2002. AIR-WATER TRANSFER OF HYDROGEN SULFIDE-An Approach for Application in Sewer Networks. *Proc. Water Environ. Fed.* 2002, 109–122. <https://doi.org/10.2175/193864702785140429>



8 ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. a) Vista de la degradación en colector de Javalí Nuevo, C/Corredera (Murcia). b) Distribución de la corrosión en una conducción (U.S. EPA, 1985).	9
Figura 2. <i>Thiobacillus Thiooxidans</i> a través de microscopio electrónico de barrido (microbewiki)	10
Figura 3. Ejemplos de corrosión en elementos de saneamiento por acción del ácido sulfúrico (Universidad de Queensland; adforensics.wordpress.com)	10
Figura 4. <i>Desulfovibrio Desulfuricans</i> a través de microscopio electrónico de barrido (EMSL Analytical)	11
Figura 5. Esquema simplificado del proceso de generación de ácido sulfhídrico y su transformación en ácido sulfúrico. Elaboración propia basada en (Hvitved-Jacobsen et al., 2013) y (U.S. EPA, 1985).....	12
Figura 6. Equilibrio entre sulfuros según el pH (U.S. EPA, 1985).	12
Figura 7. a) Detalle de test colorimétrico de sulfuros en agua residual, muestra coloreada junto a patrón de medición. b) Sonda multiparamétrica protegida y lista para introducir en la red de saneamiento. c) Equipo de medición de ácido sulfhídrico y temperatura en atmósfera de colector.....	18
Figura 8. Ajuste empleado por O. Lahav et al. (Lahav et al., 2004)	33
Figura 9. Comparación de fracciones de DQO para la simulación de fangos activados y de procesos en sistemas de saneamiento (Hvitved-Jacobsen et al., 2013).....	37
Figura 10. Situación del municipio de Murcia (editado de Wikimedia Commons)..	42
Figura 11. Geometría del modelo de red de saneamiento del municipio de Murcia.	43
Figura 12. Localización de los puntos empleados en el estudio.....	43
Figura 13. Interfaz de EPA SWMM 5.1 con modelo hidráulico del estudio.	44
Figura 14. Curvas medias diarias comunes a La Venta y Zarandona.	45
Figura 15. Curvas particularizadas a cada punto de estudio	46
Figura 16. Interfaz de IBM® SPSS® Statistics v.23 con datos organizados según variables.....	47
Figura 17. Simulación de sulfuros disueltos junto a valores puntuales de La Venta. Modelo base.....	50
Figura 18. Simulación de ácido sulfhídrico en atmósfera de la conducción de La Venta. Modelo base.	50
Figura 19. Simulación de sulfuros disueltos junto a valores puntuales de Zarandona. Modelo base.....	50
Figura 20. Simulación de ácido sulfhídrico en atmósfera de la conducción de Zarandona. Modelo base.....	50

Figura 21. H ₂ S en atmósfera de conducción simulado con modelo base, ajustado por regresión lineal y medido suavizado con media móvil. La Venta.....	55
Figura 22. H ₂ S en atmósfera de conducción simulado con modelo base, ajustado por regresión lineal y medido suavizado con media móvil. Zarandona.	55
Figura 23. Simulación de sulfuros disueltos junto a valores puntuales de La Venta. Modelo Boon y Lister.....	56
Figura 24. Simulación de ácido sulfhídrico en atmósfera de la conducción de La Venta. Modelo Boon y Lister.	57
Figura 25. Simulación de sulfuros disueltos junto a valores puntuales de Zarandona. Modelo Boon y Lister.....	57
Figura 26. Simulación de ácido sulfhídrico en atmósfera de la conducción de Zarandona. Modelo Boon y Lister.....	57
Figura 27. H ₂ S en atmósfera de conducción simulado con modelo de Boon y Lister, ajustado por regresión lineal y medido suavizado con media móvil. La Venta.	61
Figura 28. H ₂ S en atmósfera de conducción simulado con modelo de Boon y Lister, ajustado por regresión lineal y medido suavizado con media móvil. Zarandona.....	61
Figura 29. Simulación de sulfuros disueltos junto a valores puntuales de La Venta. Modelo Elmaleh.	62
Figura 30. Simulación de ácido sulfhídrico en atmósfera de la conducción de La Venta. Modelo Elmaleh.....	62
Figura 31. Simulación de sulfuros disueltos junto a valores puntuales de Zarandona. Modelo Elmaleh	63
Figura 32. Simulación de ácido sulfhídrico en atmósfera de la conducción de Zarandona. Modelo Elmaleh.	63
Figura 33. H ₂ S en atmósfera de conducción simulado con modelo de Elmaleh, ajustado por regresión lineal y medido suavizado con media móvil. La Venta.	67
Figura 34. H ₂ S en atmósfera de conducción simulado con modelo de Elmaleh, ajustado por regresión lineal y medido suavizado con media móvil. Zarandona.....	67
Figura 35. Simulación de sulfuros disueltos junto a valores puntuales de La Venta. Modelo Yongsiri.....	68
Figura 36. Simulación de ácido sulfhídrico en atmósfera de la conducción de La Venta. Modelo Yongsiri.	68
Figura 37. Simulación de sulfuros disueltos junto a valores puntuales de Zarandona. Modelo Yongsiri.....	69
Figura 38. Simulación de ácido sulfhídrico en atmósfera de la conducción de Zarandona. Modelo Yongsiri.....	69
Figura 39. Simulación de sulfuros disueltos junto a valores puntuales de La Venta. Modelo Lahav.....	70



Figura 40. Simulación de ácido sulfhídrico en atmósfera de la conducción de La Venta. Modelo Lahav.	70
Figura 41. Simulación de sulfuros disueltos junto a valores puntuales de Zarandona. Modelo Lahav.	71
Figura 42. Simulación de ácido sulfhídrico en atmósfera de la conducción de Zarandona. Modelo Lahav.	71
Figura 43. H ₂ S en atmósfera de conducción simulado con modelo de Lahav, ajustado por regresión lineal y medido suavizado con media móvil. La Venta.	74
Figura 44. H ₂ S en atmósfera de conducción simulado con modelo de Lahav, ajustado por regresión lineal y medido suavizado con media móvil. Zarandona.	75
Figura 45. Simulación de sulfuros disueltos junto a valores puntuales de La Venta. Modelo Nielsen.	76
Figura 46. Simulación de ácido sulfhídrico en atmósfera de la conducción de La Venta. Modelo Nielsen.	76
Figura 47. Simulación de sulfuros disueltos junto a valores puntuales de Zarandona. Modelo Nielsen.	77
Figura 48. Simulación de ácido sulfhídrico en atmósfera de la conducción de Zarandona. Modelo Nielsen.	77
Figura 49. H ₂ S en atmósfera de conducción simulado con modelo de Nielsen, ajustado por regresión lineal y medido suavizado con media móvil. La Venta.	80
Figura 50. H ₂ S en atmósfera de conducción simulado con modelo de Nielsen, ajustado por regresión lineal y medido suavizado con media móvil. Zarandona.	81
Figura 51. Gráfico con el conjunto de regresiones válidas sobre la medición en atmósfera del colector suavizada con media móvil de 20 valores. La Venta.	83
Figura 52. Gráfico con el conjunto de regresiones válidas sobre la medición en atmósfera del colector suavizada con media móvil de 20 valores. Zarandona.	83
Figura 53. Logotipos de las entidades formadoras del convenio C-128/2017.	99



9 ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Valores adoptados para las variables simuladas en Zarandona y La Venta. Modelo base.....	49
Tabla 2. Matriz de correlaciones bivariadas para La Venta. Modelo base.....	51
Tabla 3. Matriz de correlaciones bivariadas para Zarandona. Modelo base.	52
Tabla 4. Matriz de varianza total explicada y extracción de componentes principales para La Venta. Modelo base.	53
Tabla 5. Matriz de varianza total explicada y extracción de componentes principale para Zarandona. Modelo base.....	53
Tabla 6. Matriz de correlación entre variables y componentes principales para La Venta. Modelo base.	54
Tabla 7. Matriz de correlación entre variables y componentes principales para Zarandona. Modelo base.....	54
Tabla 8. Valores adoptados para las variables simuladas en Zarandona y La Venta. Modelo Boon y Lister.....	56
Tabla 9. Matriz de correlaciones bivariadas en La Venta. Modelo Boom y Lister...	58
Tabla 10. Matriz de correlaciones bivariadas en Zarandona. Modelo Boom y Lister.	58
Tabla 11. Matriz de varianza total explicada y extracción de componentes principales para La Venta. Modelo Boon y Lister	59
Tabla 12. Matriz de varianza total explicada y extracción de componentes principale para Zarandona. Modelo Boon y Lister.....	59
Tabla 13. Matriz de correlación entre variables y componentes principales para La Venta. Modelo Boon y Lister.	60
Tabla 14. Matriz de correlación entre variables y componentes principales para Zarandona. Modelo Boon y Lister.....	60
Tabla 15. Valores adoptados para las variables simuladas en Zarandona y La Venta. Modelo Elmaleh.	62
Tabla 16. Matriz de correlaciones bivariadas para La Venta. Modelo Elmaleh.	63
Tabla 17. Matriz de correlaciones bivariadas para Zarandona. Modelo Elmaleh.	64
Tabla 18. Matriz de varianza total explicada y extracción de componentes principales en La Venta. Modelo Elmaleh.....	64
Tabla 19. Matriz de varianza total explicada y extracción de componentes principale en Zarandona. Modelo Elmaleh.....	65
Tabla 20. Matriz de correlación entre variables y componentes principales para La Venta. Modelo Elmaleh.....	65

Tabla 21. Matriz de correlación entre variables y componentes principales para Zarandona. Modelo Elmaleh.	66
Tabla 22. Valores adoptados para las variables simuladas en Zarandona y La Venta. Modelo Yongsiri.....	68
Tabla 23. Valores adoptados para las variables simuladas en Zarandona y La Venta. Modelo Lahav.....	70
Tabla 24. Matriz de correlaciones bivariadas para La Venta. Modelo Lahav.....	71
Tabla 25. Matriz de correlaciones bivariadas para Zarandona. Modelo Lahav.	72
Tabla 26. Matriz de varianza total explicada y extracción de componentes principales para La Venta. Modelo Lahav.	72
Tabla 27. Matriz de varianza total explicada y extracción de componentes principale para Zarandona. Modelo Lahav.....	73
Tabla 28. Matriz de correlación entre variables y componentes principales para La Venta. Modelo Lahav.	73
Tabla 29. Matriz de correlación entre variables y componentes principales para Zarandona. Modelo Lahav.....	74
Tabla 30. Valores adoptados para las variables simuladas en Zarandona y La Venta. Modelo Nielsen.....	76
Tabla 31. Matriz de correlaciones bivariadas para La Venta. Modelo Nielsen.	77
Tabla 32. Matriz de correlaciones bivariadas para Zarandona. Modelo Nielsen.	78
Tabla 33. Matriz de varianza total explicada y extracción de componentes principales para La Venta. Modelo Nielsen.....	78
Tabla 34. Matriz de varianza total explicada y extracción de componentes principale para Zarandona. Modelo Nielsen.....	79
Tabla 35. Matriz de correlación entre variables y componentes principales para La Venta. Modelo Nielsen.	79
Tabla 36. Matriz de correlación entre variables y componentes principales para Zarandona. Modelo Nielsen.	80
Tabla 37. Comparación de valores de R^2 para los dos puntos estudiados y según modelo empírico.	82
Tabla 38. Valores mínimos, máximos y medios adoptados por las variables utilizadas en la regresión de La Venta.	84
Tabla 39. Índice de sensibilidad, IS, obtenido para los valores mínimo y máximo de las variables de la regresión en La Venta.	84
Tabla 40. Valores mínimos, medios y máximos adoptados por las variables utilizadas en la regresión de Zarandona.....	85
Tabla 41. Índice de sensibilidad, IS, obtenido para los valores mínimo y máximo de las variables de la regresión en Zarandona.....	85



10 AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido posible gracias al Convenio entre EMUASA y la UPCT para “Conocer y Cuantificar los fenómenos de Generación de Sulfuros en las redes de Saneamiento de la ciudad de Murcia y establecer prácticas correctoras para su minimización” C-128/2017.



Figura 53. Logotipos de las entidades formadoras del convenio C-128/2017.