



Universidad  
Politécnica  
de Cartagena

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA DE CAMINOS, CANALES Y  
PUERTOS Y DE INGENIERÍA DE MINAS

GRADO EN INGENIERÍA CIVIL

**PREDICCIÓN DE TASAS DE CORROSIÓN  
DEBIDAS A LA ACCIÓN DEL SULFURO DE  
HIDRÓGENO EN PUNTOS DE LA RED DE  
SANEAMIENTO DE LA REGIÓN DE  
MURCIA**

*Autor: Mario Driéguez Castaño*

*Tutor: Juan Tomás García Bermejo*

*Cartagena, Octubre de 2017*

## **Resumen**

Los sulfuros generados en los sistemas de alcantarillado de todo el mundo son uno de los problemas más importantes para las personas dedicadas a la gestión de estos sistemas. Además de su mal olor, el sulfuro de hidrógeno plantea un serio problema para la integridad estructural de las líneas de alcantarillado, debido al proceso de corrosión asociado. El objetivo de este trabajo es predecir la tasa futura de corrosión de dos puntos de la red de alcantarillado de la Región de Murcia. Basándose en datos de campo existentes sobre sulfuro de hidrógeno disuelto y en la atmósfera de estas tuberías, y utilizando diferentes modelos, es posible predecir cuántos milímetros de hormigón se perderán en las tuberías por la acción del sulfuro de hidrógeno.

## **Abstract**

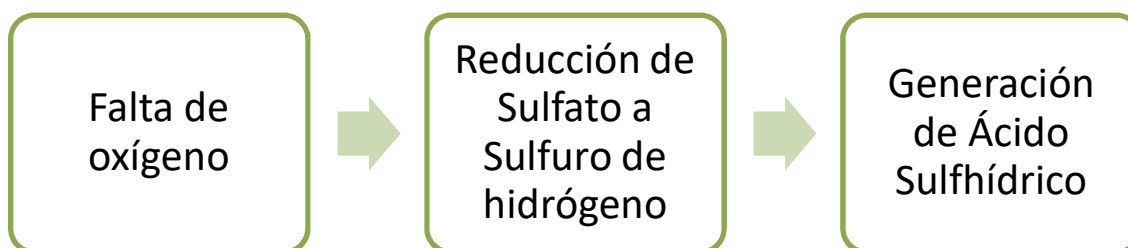
Sulfides generated in sewage systems around the world are one of the most important problems for the people dedicated to the management of these systems. In addition to its bad odor, hydrogen sulfide poses a serious problem for the structural integrity of sewer lines, due to the associated corrosion process. The objective of this work is to predict the future rate of corrosion in two points of the sewerage network of the Región de Murcia. Based on existing field data on dissolved hydrogen sulfide and in the atmosphere of these pipes, and using different models, it is possible to predict how many millimeters of concrete will be lost in the pipes by the action of hydrogen sulfide.

# Índice

- 1. Introducción y definiciones previas**
- 2. Estudios realizados al respecto**
- 3. Control de olores y corrosión en sistemas sanitarios y plantas de tratamiento**
- 4. Predicción de tasas de corrosión en la red de saneamiento de la Región de Murcia**
- 5. Conclusiones**
- 6. Referencias bibliográficas**

## **1. Introducción y definiciones previas**

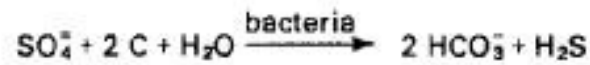
Las redes de alcantarillado para el transporte de aguas residuales son uno de los elementos de infraestructura más importantes de las ciudades modernas, y su establecimiento se ha logrado a través de la inversión pública continua durante más de un siglo. La corrosión del hormigón del que se componen estas redes es un proceso de degradación que afecta a los sistemas de alcantarillado en todo el mundo. La corrosión provoca la pérdida de masa de hormigón y disminuye su capacidad estructural, dando lugar a grietas en tuberías de alcantarillado y, en última instancia, colapso estructural. La corrosión del hormigón en las alcantarillas implica una combinación de procesos físicos, químicos y biológicos, en los cuales, la generación de sulfuro de hidrógeno en las conducciones resulta determinante. El sulfuro de hidrógeno surge debido a la falta de oxígeno necesario para la realización de los procesos biológicos en las aguas residuales.



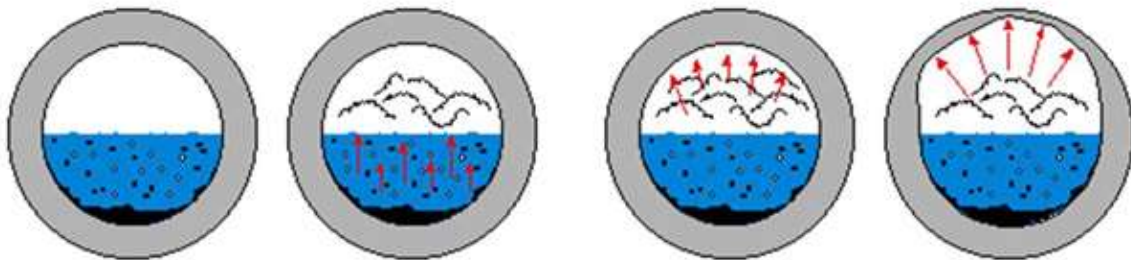
La concentración crítica de oxígeno disuelto en el agua residual por debajo de la cual puede producirse una reducción de sulfato es de 0,1 a 1,0 mg / l. (EPA)

El sulfuro de hidrógeno, además de tener la capacidad de corroer diversos materiales utilizados en la construcción de alcantarillas y plantas de tratamiento, es una de las principales causas de olores en los sistemas de tratamiento de aguas residuales. En el año 1973, una encuesta realizada en 500 plantas de tratamiento en los Estados Unidos, indicó que en el 40 por ciento de las plantas se habían recibido quejas sobre los olores (Lovett W.D. and R.L. Poltorak. *Activated Carbon Used to Control Odors.*). Todo esto ha hecho que sea imprescindible considerar adecuadamente el control de sulfuros en el diseño de nuevos sistemas de alcantarillado sanitario.

En la red de alcantarillado, el sulfuro de hidrógeno es generado por bacterias reductoras de sulfato anaeróbico (microbios asimilativos, bacterias proteolíticas y bacterias reductoras de sulfato), principalmente en las secciones principales de bombeo.



El sulfuro de hidrógeno es transportado por el agua residual que recorre las redes de saneamiento por efecto de la gravedad en lámina libre. Estos gases de H<sub>2</sub>S se desprenden a la atmosfera interna del tubo y son fijados en la superficie interior del mismo, húmedo por condensación. En una segunda fase y en estas superficies no inundadas, las bacterias aerobias *Thiobacillus* realizan la oxidación biológica del H<sub>2</sub>S y la producción de sulfúrico (Parker, 1945, 1947, Pomeroy y Bowlus, 1946), responsable del ataque corrosivo del hormigón (Islander et al., 1991; Ismail et al., 1993).



El H<sub>2</sub>S puede ser también producido por la descomposición anaeróbica de aminoácidos tales como cisteína, cistina y metionina. Este proceso de fermentación es llevado a cabo por muchas especies de bacterias proteolíticas.

Está demostrado (Parker, 1945, Nathansohn, 1902, Beijerinck, 1904, Starkey, 1934, Vincke, 2000), que en las tuberías de hormigón afectadas por corrosión debida a la exposición a atmósferas que contienen sulfuro de hidrógeno, aparecen una serie de bacterias de azufre nombradas provisionalmente *Thiobacillus concretivorus*. Estas bacterias son imprescindibles para la corrosión de la tubería, ya que esta no se lleva a cabo en condiciones estériles sino que necesita de la actividad de estos organismos. Es típico en este tipo de corrosión que el pH de la tubería caiga continuamente a medida que se establece el proceso de corrosión. Como los *Thiobacillus concretivorus* no pueden existir con un pH superior a 6,5, su actividad no puede explicar la etapa inicial del proceso, en la cual el pH de la superficie de hormigón fresco es superior a ese valor. Se sugirió entonces que esta caída preliminar del pH podría ser provocada por reacciones puramente químicas o por la actividad de otras especies de bacterias. Uno de estos grupos de bacterias es un organismo autotrófico capaz de generar una película de azufre y reducir rápidamente el pH hasta valores cercanos a 3-3,5. Este grupo es similar en muchos aspectos al conocido como *Thiobacillus Thioparus*. El segundo grupo consiste en una colección diversa de

especies, todas ellas autotróficas y con la capacidad de crecer abundantemente en medios nutritivos. Su desarrollo óptimo se produce cuando el pH se encuentra entre 7-10.

Estos tres grupos de bacterias predominan en distintas fases del proceso de corrosión. El grupo de especies misceláneas aparece en la fase inicial del proceso, con valores de pH entre 9-11. Las especies similares al *Thiobacillus Thioparus* las encontramos cuando el pH se encuentra entre 5-9. Por último, los *Thiobacillus concretivorus* aparecen en las etapas finales, con valores de pH inferiores a 5.

El proceso de corrosión en una tubería seguiría pues, el siguiente proceso:

La pared de la tubería de hormigón nuevo, con un pH de 11-12, al estar expuesta a una atmósfera que contiene Sulfuro de Hidrógeno sufrirá un doble cambio químico. La carbonatación normal baja el pH hasta 8,4 y la transformación del Sulfuro de Hidrógeno en ácido tiosulfúrico y ácidos poli tiónicos hasta 7,5. Mientras que estos cambios puramente químicos se producen, aparece la proliferación bacteriana del grupo misceláneo de oxidantes lentos del tiosulfato. A medida que el pH desciende por debajo de 9, el grupo de bacterias similar al *Thiobacillus Thioparus* se multiplica y su oxidación de tiosulfato y politionato a azufre y ácido sulfúrico da como resultado una rápida caída del pH. Esto continua hasta que el pH desciende por debajo de 5, momento en el cual las bacterias de *Thiobacillus concretivorus* produce altas concentraciones de ácido sulfúrico libre, apareciendo así los productos finales del proceso de corrosión.

## **2. Estudios realizados al respecto**

Multitud de estudios e investigaciones se han llevado a cabo durante décadas para intentar conocer mejor cómo funciona el complejo proceso de corrosión del hormigón utilizado para el transporte de aguas residuales. Resumimos aquí algunos de los más destacados.

### **Corrosión del hormigón en el sistema de alcantarillado de Hamburgo**

*(Wolfgang Sand, Eberhard Bock, Universidad de Hamburgo, 1984)*

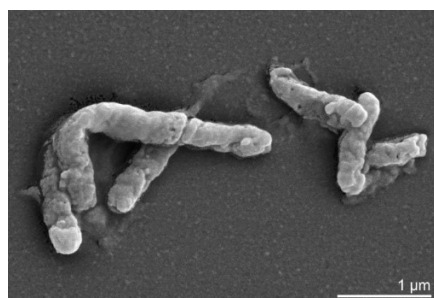
Tras un periodo de entre cuatro y seis años desde el comienzo de las operaciones de funcionamiento del sistema de alcantarillado de Hamburgo, se observaron serios problemas de corrosión en las tuberías del sistema. Las nuevas alcantarillas de hormigón

sufrieron deterioros de más de 6 cm de profundidad, a pesar de estar protegidas por una fina capa de resina epoxi. Por esta razón, el Departamento de Drenaje Municipal de Hamburgo inició una investigación en 1978 sobre el curso y la prevención de la corrosión. Se desarrolló un proceso de investigación interdisciplinario en la que químicos, ingenieros civiles y microbiólogos colaboraron bajo la supervisión de las autoridades correspondientes.

Se recogieron muestras en varias zonas del alcantarillado y se clasificaron según presentaban corrosión fuerte, mediana o despreciable. Excepto en las zonas fuertemente corroídas, se observó una capa alrededor de las tuberías compuesta de bacterias, hongos, materiales orgánicos muertos y minerales.

Los estudios se centraron en el desarrollo de una **simulación de la corrosión del hormigón en una cámara de reproducción de H<sub>2</sub>S estrictamente controlada**. La empresa Weiss-Technik fue la encargada del diseño de la cámara donde se llevaría a cabo la simulación. Este compartimento de reproducción tenía un volumen de  $10^3 \text{ dm}^3$  y se llenó con agua hasta una profundidad de 10 cm. Al aumentar la temperatura del agua por encima de la temperatura de las paredes (2-3°C) se consiguió una humedad elevada, por encima del 95%. Se seleccionó una temperatura de cría de 30°C. Las muestras de hormigón de 60 x 11 x 7 cm (altura x ancho x profundidad) se colocaron dentro de la cámara, sumergidas parcialmente. La atmósfera del compartimento fue monitorizada de manera que se consiguió mantener una concentración constante de  $10 \pm 1$  ppm de H<sub>2</sub>S. Para la inoculación de la muestra se instalaron dos boquillas en la tapa de la cámara de reproducción. Usando aire comprimido, se inyectaron suspensiones concentradas de *thiobacillus* en el compartimento generando una niebla que contenía los organismos. Para monitorear el proceso de corrosión se midieron los valores de pH de las superficies de hormigón constantemente mediante indicadores de pH. Por último, para la investigación del proceso de corrosión, se retiraron los bloques de la muestra de hormigón, se transfirieron a botellas con 50 ml de solución de lavado estéril y se incubaron en un agitador rotatorio durante 30 minutos.

Los datos del estudio determinaron que, aunque se observaban considerables oscilaciones entre las distintas zonas de las muestras, existía un enriquecimiento general significativo del número de *thiobacillus* en toda la masa de hormigón. Más allá de esto se pudo demostrar que en el sitio que exhibía el mayor grado de corrosión, especies de *Thiobacillus thiooxidans* superaban en número a los otros



*thiobacillus*. Esto llevó a la conclusión de que el número de células de *Thiobacillus thiooxidans* es un estándar cuantitativo válido para el grado de corrosión. Además, el número de células de *Thiobacillus thiooxidans* permite predecir dónde podría ocurrir la corrosión en una tubería de alcantarillado. Estos resultados fueron utilizados en el sistema de alcantarillado de Hamburgo, en el que se controlaron estas especies problemáticas. La disminución del pH que tuvo lugar en las superficies de hormigón durante los primeros 100 días fue la primera indicación del proceso de corrosión. Debido a las diferentes capacidades de los tipos de hormigón y a las cantidades variables de ácido sulfúrico producido por los *thiobacillus*, el valor final del pH de la superficie del hormigón difirió significativamente. Por esta razón, el pH puede no ser una herramienta adecuada para cuantificar el proceso de corrosión, resultando un estándar mucho más preciso el número de células de *Thiobacillus thiooxidans*. El estudio reveló también que, como ya se sabía, el sulfuro de hidrógeno, que se generó en aguas residuales anaeróbicas por las actividades de las bacterias reductoras de sulfato, escapó de las aguas residuales y se condensó en las paredes de las alcantarillas. Mediante reacciones químicas de auto oxidación se generó azufre que a su vez fue oxidado por los *thiobacillus* a ácido sulfúrico.

#### Análisis del funcionamiento de tuberías de hormigón reforzado

(John C. Potter, Member, ASCE, 1988)

Con el fin de conocer cómo sucede el proceso de desgaste de las tuberías de hormigón, el Departamento de Transporte de Ohio, entre los años 1972-1975, inspeccionó 545 alcantarillas de tubería de hormigón, de las que al final fueron objeto de estudio 399. Para este estudio se seleccionaron una serie de variables a observar: edad de la tubería, elevación, profundidad del flujo, velocidad del flujo, profundidad del sedimento, pendiente, pH,... sin embargo, las concentraciones de sulfato y cloruro (necesarias para determinar la agresividad del agua) no se obtuvieron.

Hurd (1984) desarrolló una ecuación de vida útil basada en un subconjunto de estos datos. Utilizó sólo datos de tuberías con diámetros mayores de 42 pulgadas para mejorar la precisión. También utilizó sólo los datos con un pH inferior a 7,0, suponiendo que el ataque ácido es el principal mecanismo de deterioro, y puesto que no puede haber ataque de ácido con un pH de 7,0 o mayor, estos datos no fueron necesarios. Con estos requisitos quedó un conjunto de 45 casos, que posteriormente aumento hasta 59.



$$\text{rating} = [6.501 (\text{age})^{0.55} (\text{rise})^{1.079} (\text{slope})^{0.233} (\text{pH})^{-3.079}] \left[ 1 - \left( \frac{\text{sed}}{\text{rise}} \right) \right]^{1.465} \dots\dots\dots$$

Donde “rating” es la condición de la tubería de 0 a 100, siendo 0 la recién fabricado y 95 el final de la vida útil de la tubería. “Age” es la edad del tubo en el momento de la inspección, “rise” el diámetro de la misma, “slope” la pendiente, “pH” el pH del agua y “sed” la profundidad del sedimento en la tubería.

**Hadipriono (1986)** también usó los datos de Ohio para modelar la **clasificación de tubería**. Se ajustó una ecuación de regresión lineal, para el conjunto completo de datos de 399 casos. Él sostuvo que los factores en el deterioro de la tubería tales como el desgaste, la velocidad de abrasión y la reducción del sulfato contribuyeron al deterioro de la tubería sin importar el pH. Por lo que se introdujeron datos de todo el rango de pH. También incluyó tamaños de tubería de menos de 42 pulgadas para aprovechar la información aportada por estos casos.

$$\text{rate} = 5.7478 + 0.0304 (\text{age}) - 0.0752 (\text{flow}) - 0.0134 (\text{sed}) - 4.8920 (\log \text{pH}) + 0.1264 \sqrt{\text{slope}} + 0.0085 (\text{rise}) \dots\dots\dots$$

Donde “rate” en este caso se mueve entre 1 y 5, siendo 1 unas condiciones excelentes en la tubería y 5 el final de su vida útil. “Flow” es la velocidad del flujo y el resto de variables iguales a las de la ecuación de Hurd.

Los coeficientes de determinación, que expresan la bondad de la predicción de estas ecuaciones, indican que la forma de la ecuación de Hadipriono (aditivo, lineal) describe más de cerca el fenómeno del deterioro de la tubería que la ecuación de Hurd (multiplicativa, no lineal), para cualquiera de los conjuntos de datos.

Cases (1)	Equation	
	Hadipriono (1986) (2)	Hurd (1985) (3)
59	0.7	0.6
399	0.4	0.3

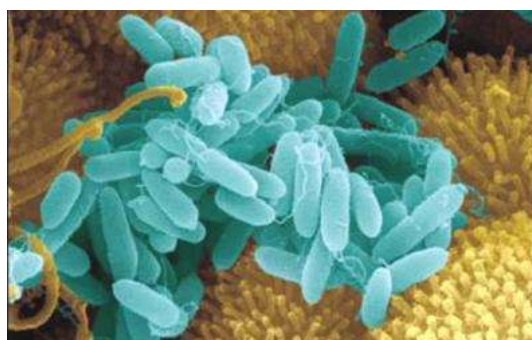
Coefficientes de determinación de las distintas ecuaciones

Sin embargo, ninguno puede ser descrito como un "buen" modelo debido a los bajos valores de estos coeficientes. Aunque alguna de estas ecuaciones pueda utilizarse para estimar cuánto tardará una tubería de hormigón en dejar de ser eficiente, cuentan con muchas limitaciones, como son, la dispersión de los datos observados, el hecho de que estos modelos estén basados en las condiciones presentes en Ohio, la evolución de la tecnología que hace que actualmente las tuberías instaladas puedan durar mucho más tiempo, etc.

### Corrosión microbiana del hormigón

(M. Diercks, W. Sand, E. Bock, Universidad de Hamburgo, 1991)

Como ya sabemos, los *Thiobacillus* productores de ácido sulfúrico causan corrosión severa de las paredes de hormigón en tuberías de aguas residuales. Las bacterias excretan el ácido sulfúrico, que degrada el material de estas conducciones. A parte de esto, en edificios y estructuras de hormigón, se han encontrado un alto número de organismos nitrificantes. El ácido nítrico, que es excretado por estos organismos como producto final metabólico, también causa corrosión severa. Las bacterias nitrificantes crecen en la superficie y dentro de los poros de las piedras, pudiendo sobrevivir a congelación, descongelación y sequedad. Los organismos nitrificantes y los *thiobacillus* destruyen los materiales de construcción compuestos de hormigón mediante la producción de ácidos minerales.



El impacto de los microorganismos se demostró mediante la simulación del proceso natural en cámaras de cría de estos microorganismos. Las conclusiones de esta investigación determinaron que los microorganismos pueden contribuir sustancialmente a la degradación de los materiales de construcción (hormigón, piedra natural, cerámica y vidrio). Los microorganismos sólo pueden desempeñar un papel importante en el deterioro si están acompañados de sustrato. El sustrato puede originarse a partir de fuentes exógenas o endógenas. Fuentes exógenas pueden ser aguas subterráneas, aguas residuales, materiales de desecho, etc., mientras que las fuentes endógenas pueden originarse a partir del propio material depositado. Si se dan estas circunstancias el metabolismo de los *thiobacillus* y nitrificantes da como resultado la excreción de ácido

sulfúrico o ácido nítrico, lo que puede cambiar la resistencia de los materiales de construcción

### **Modelización dinámica de la producción de H<sub>2</sub>S en sistemas de alcantarillado**

*(Keshab Raj Sharma, Zhiguo Yuan, David de Haas, Geoff Hamilton, Universidad de Queensland, Australia, 2008)*

Para conocer el proceso de corrosión en conducciones de hormigón se estudiaron y realizaron mediciones en dos sistemas de bombeo (UC09 y TH5) en la Gold Coast City Council en Australia. Los estudios predijeron, entre otras cosas, que moviendo el punto de inyección de oxígeno de la tubería a una posición cercana al final de la conducción se conseguía lograr el mismo grado de control de sulfuros pero con un 50% menos de oxígeno. En la observación de estas conducciones en Australia, los factores determinantes en la generación de sulfuros que se tuvieron en cuenta fueron:

- Velocidad del flujo
- Concentración de materia orgánica
- Concentración de sulfatos
- Temperatura
- Presencia de aceptores de electrones (como oxígeno)

Se instaló una disposición especial de muestreo consistente en un tubo de 16 mm de diámetro que conectaba un grifo de toma de muestras situado al nivel del suelo. Las muestras recogidas se analizaron para diferentes especies de azufre disueltas (sulfuro, sulfato, sulfito y tiosulfato) y ácidos grasos volátiles. El patrón de flujo en ambas corrientes ascendentes fue intermitente debido al funcionamiento de la bomba y varió significativamente entre las dos estaciones de bombeo.



Con los datos obtenidos se formuló un modelo principal que describe los procesos anaeróbicos y aeróbicos de transformación de carbono y azufre, previamente descritos por otros autores (*Freudenthal et al., 2005, Huisman, 2001, Hvitved-Jacobsen, 2002,*

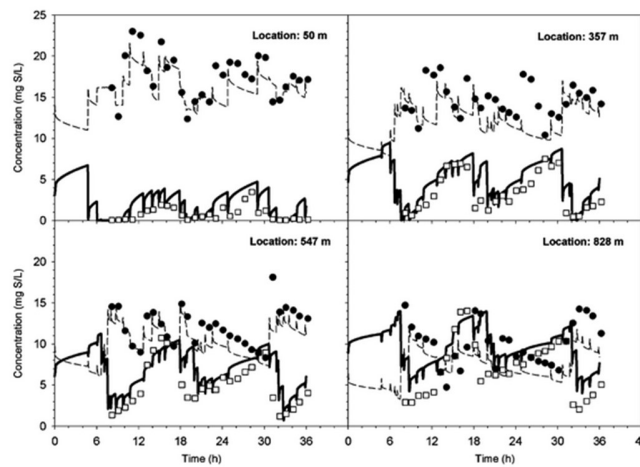
Nielsen et al, 2005). Se utilizaron dos conjuntos de datos, uno recogido de UC09 sin inyección de oxígeno y otro de TH5 con inyección de oxígeno, para determinar los parámetros clave del modelo. Estos incluyeron la máxima tasa de producción de sulfuro por área, la máxima tasa de fermentación y la tasa de oxidación química del sulfuro. Estos parámetros se ajustaron manualmente para obtener un buen ajuste entre los datos simulados y los medidos. El **resumen de los procesos del modelo y sus expresiones cinéticas**, se muestra a continuación:

	Proceso	Reacción	Componente de referencia	Grado de reacción
1	Crecimiento aeróbico de la biomasa en el líquido	$\frac{1}{Y_{Hw}}(FCOD + VFA) + \frac{(1 - Y_{Hw})}{Y_{Hw}}O_2$ $\rightarrow Bw + \frac{(1 - Y_{Hw})}{Y_{Hw}}\frac{100}{32}CO_2$	$X_{BW}$ (concentración de biomasa heterotrófica activa en la fase acuosa)	$\mu_H \frac{(S_{FCOD} + S_{VFA})}{K_{Sw} + (S_{FCOD} + S_{VFA})} \frac{S_{O_2}}{K_{O_2} + S_{O_2}} X_{BW}$
2	Crecimiento aeróbico de biomasa en el biofilm	$\frac{1}{Y_{Hf}}(FCOD + VFA) + \frac{(1 - Y_{Hf})}{Y_{Hf}}O_2$ $\rightarrow Bw + \frac{(1 - Y_{Hf})}{Y_{Hf}}\frac{100}{32}CO_2$	$X_{BW}$	$k_{1/2} \sqrt{S_{O_2}} \frac{Y_{Hf}}{(1 - Y_{Hf})} \frac{A}{V} \frac{(S_{FCOD} + S_{VFA})}{K_{Sf} + (S_{FCOD} + S_{VFA})}$
3	Mantenimiento aeróbico requerido	$Bw + O_2 \rightarrow \frac{100}{32}CO_2$	$X_{BW}$	$-q_{Im} \frac{S_{O_2}}{K_{O_2} + S_{O_2}} X_{BW}$
4	Hidrólisis aerobia del sustrato lentamente biodegradable	$SBCOD \rightarrow FCOD + iSXS \cdot H_2S + iSXN \cdot NH_3$	$X_{SBCOD}$ (demanda química de oxígeno)	$-k_h \frac{X_{SBCOD} + X_{BW}}{K_X + X_{SBCOD} + X_{BW}} \frac{S_{O_2}}{K_{O_2} + S_{O_2}} (X_{BW} + \epsilon X_{Bf} \frac{A}{V})$
5	Hidrólisis anaeróbica del sustrato lentamente biodegradable	$SBCOD \rightarrow FCOD + iSXS \cdot H_2S + iSXN \cdot NH_3$	$X_{SBCOD}$	$-\eta_{fe} k_h \frac{X_{SBCOD} + X_{BW}}{K_X + X_{SBCOD} + X_{BW}} \frac{S_{O_2}}{K_{O_2} + S_{O_2}} (X_{BW} + \epsilon X_{Bf} \frac{A}{V})$
6	Fermentación	$FCOD \rightarrow VFA$	$S_{FCOD}$ (demanda química de oxígeno fermentable)	$-q_{fe} \frac{S_{FCOD}}{K_{fe} + S_{FCOD}} \frac{K_{O_2}}{K_{O_2} + S_{O_2}} (X_{BW} + \epsilon X_{Bf} \frac{A}{V})$
7	Generación de sulfuro debido al sustrato fermentable	$2FCOD + SO_4 \rightarrow H_2S$	$S_{H_2S}$ ( Sulfuro de Hidrógeno disuelto)	$k_{H_2S} \frac{(S_{FCOD} + S_{VFA})}{K_{Sf} + (S_{FCOD} + S_{VFA})} \frac{S_{SO_4}}{K_{SO_4} + S_{SO_4}} \frac{K_{O_2}}{K_{O_2} + S_{O_2}} \frac{A}{V} \frac{S_{FCOD}}{S_{FCOD} + S_{VFA}}$

PREDICCIÓN DE TASAS DE CORROSIÓN DEBIDAS A LA ACCIÓN DEL SULFURO DE HIDRÓGENO EN PUNTOS DE LA RED DE SANEAMIENTO DE LA REGIÓN DE MURCIA

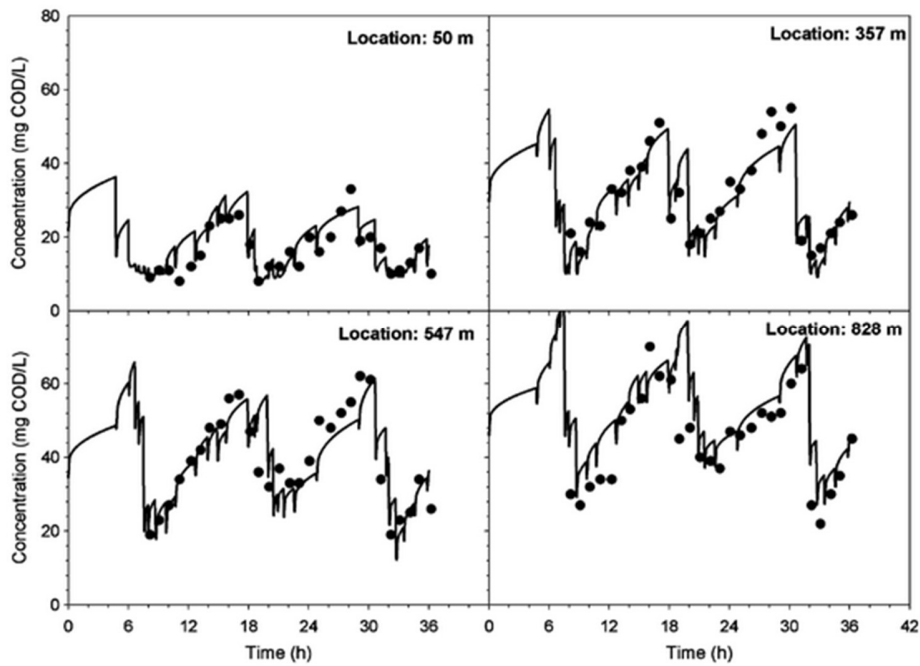
8	Generación de sulfuro mediante VFA	$2VFA + SO_4 \rightarrow H_2S$	$S_{H_2S}$	$k_{H_2S} \frac{(S_{FCOD} + S_{VFA}) S_{SO_4}}{K_{SF} + (S_{FCOD} + S_{VFA}) K_{SO_4} + S_{SO_4}} \frac{K_{O_2} A S_{VFA}}{K_{O_2} + S_{O_2} V S_{FCOD} + S_{VFA}}$
9	Oxidación química del sulfuro	$2O_2 + H_2S \rightarrow SO_4$	$S_{SO_4}$ (Sulfato)	$k_{chem-oxi} S_{O_2} S_{H_2S}$
10	Oxidación biológica del sulfuro	$2O_2 + H_2S \rightarrow SO_4$	$S_{SO_4}$	$k_{bio-oxi} \sqrt{S_{O_2}} \sqrt{S_{H_2S}} \frac{A}{V}$

El modelo resultante fue capaz de reproducir las variaciones en las concentraciones de sulfuro y sulfato razonablemente bien, por lo que quedo validado. Este modelo es capaz de hacer predicciones razonables de la dinámica de la producción de H2S en cualquier red de alcantarillado que reciba aguas residuales domésticas, siempre y cuando los datos de flujo y las dimensiones del alcantarillado estén disponibles, por lo tanto, es una herramienta potencialmente útil para la gestión del sistema de alcantarillado con respecto al control de H2S.

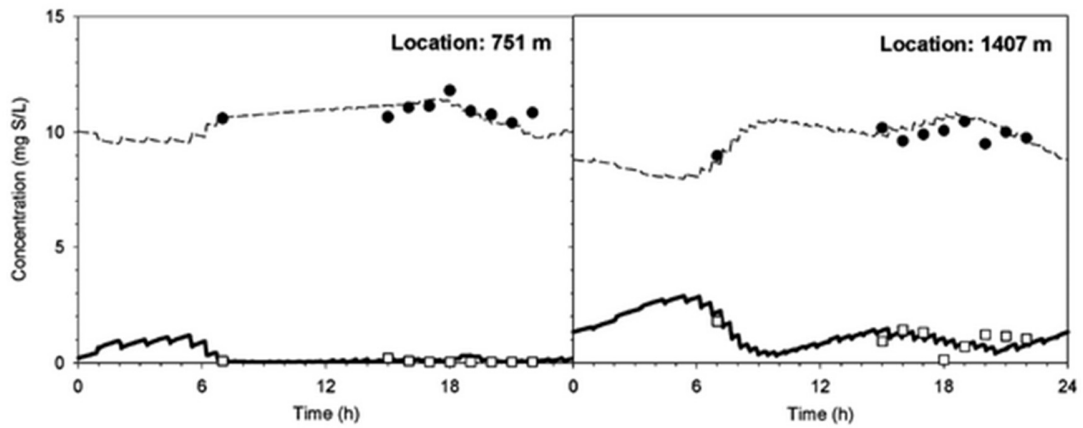


Calibración del modelo en cuatro ubicaciones a lo largo de UC09. Sulfuro disuelto simulado (línea continua), sulfato simulado (línea discontinua), Sulfato disuelto medido (cuadrado) y sulfato medido (círculo).

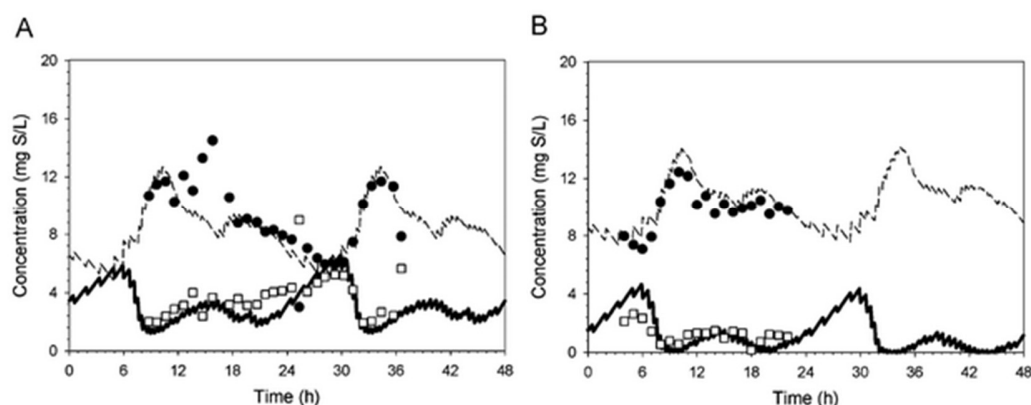
PREDICCIÓN DE TASAS DE CORROSIÓN DEBIDAS A LA ACCIÓN DEL SULFURO DE HIDRÓGENO EN PUNTOS DE LA RED DE SANEAMIENTO DE LA REGIÓN DE MURCIA



Calibración del modelo en cuatro ubicaciones a lo largo de UC09. VFA simulado (línea continua), VFA medida (círculo).



Ajuste entre el modelo simulado y medido (Campaña 2, con inyección de oxígeno). Sulfuro disuelto simulado (línea gruesa sólida), sulfato simulado (línea punteada), sulfuro disuelto medido (cuadrado), sulfato medido (círculo).



Validación del modelo: ajuste entre las concentraciones previstas de sulfuro y sulfato con valores medidos a 1407 m en TH5. (A) Resultados sin inyección de oxígeno en la Campaña 3; (B) con la inyección de oxígeno en la Campaña 4. Sulfuro disuelto simulado (línea gruesa sólida), sulfato simulado (línea punteada), sulfuro disuelto medido (cuadrado), sulfato medido (círculo).

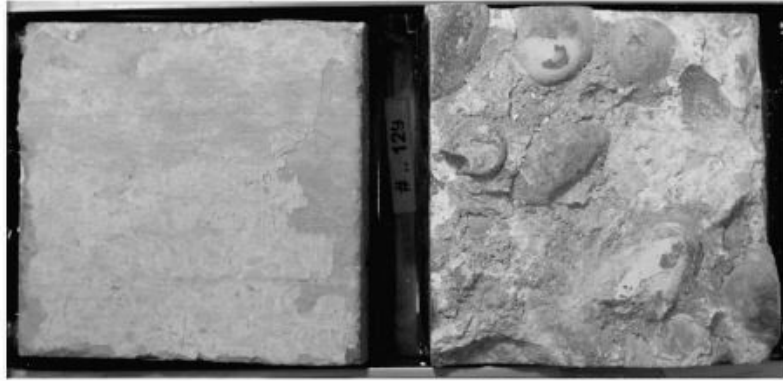
### Modelos matemáticos para la predicción de la corrosión interna presente y futura

*(Universidad de Newcastle, Australia, diciembre 2010)*

El desarrollo de modelos matemáticos racionales para la predicción de la probable corrosión interna presente y futura en alcantarillados de hormigón armado requiere la comprensión de los importantes procesos físico-químicos que la preceden. A finales del año 2010 la Universidad de Newcastle en Australia expuso muestras de hormigones pre-corroídos nuevos y de 70 años de antigüedad durante 31 meses en un ambiente agresivo de alcantarillado en la ciudad de Perth, a 26 ° C, 98% de humedad relativa y 79 ppm de concentración de H<sub>2</sub>S (promedios). Se utilizaron pares de 3 muestras (3 hormigones nuevos y 3 antiguos) en 7, 14, 19, 26 y 31 meses de exposición.

Los cambios en la morfología de la superficie fueron evidentes tanto en las muestras antiguas como en las nuevas después de 7 meses de exposición. Tras estos 7 meses, la corrosión cristalina inicial de 2 mm de espesor que había presente en las muestras antiguas se sustituyó por un revestimiento blanco pastoso de 6 mm de profundidad similar en apariencia y textura al presente en los hormigones nuevos. Después de 19 meses de exposición, la profundidad del producto de corrosión fue de aproximadamente 9 mm y 31 meses de exposición fue de aproximadamente 12 mm.

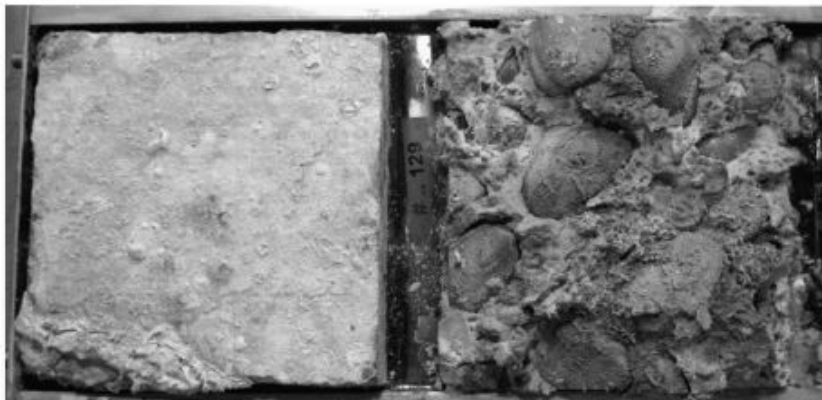
Antes de la exposición



Hormigón nuevo

Hormigón antiguo

Después de 7 meses



Hormigón nuevo

Hormigón antiguo

Después de 26 meses de exposición, las superficies expuestas tanto de los hormigones nuevos como de los antiguos resultaban prácticamente indistinguibles. Ambas superficies fueron cubiertas enteramente con una capa de corrosión de color blanco y altamente porosa.



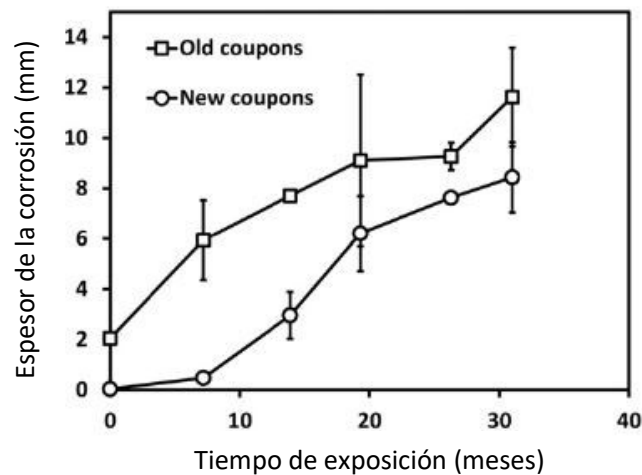
Después de 26 meses



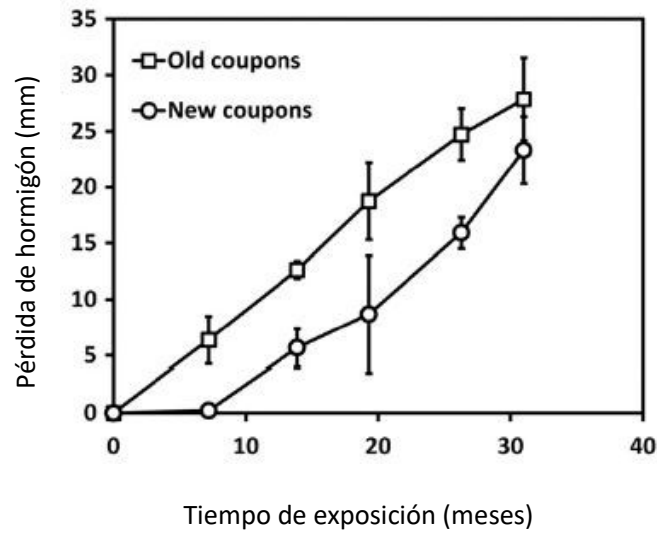
Hormigón nuevo

Hormigón antiguo

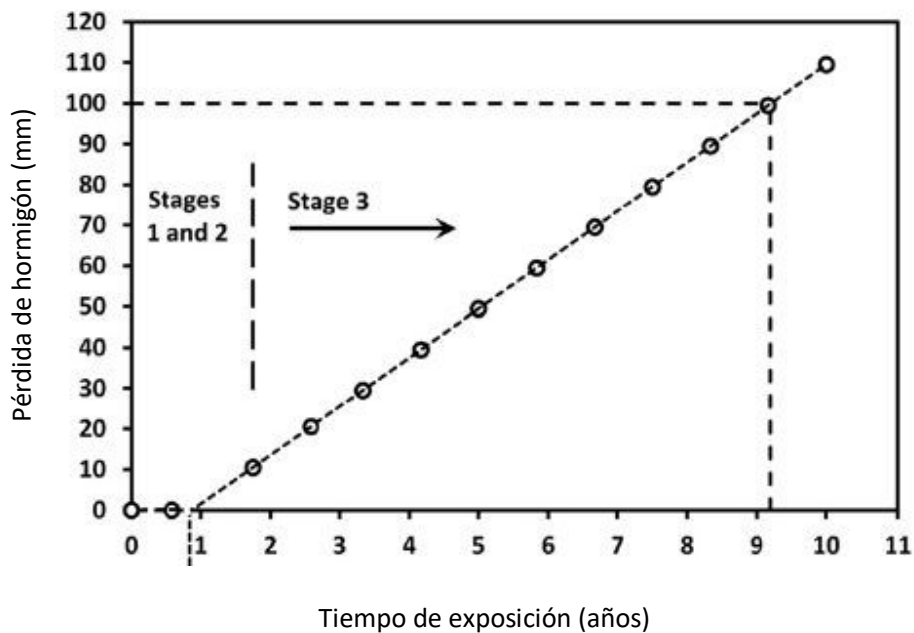
En cuanto a la pérdida de hormigón experimentada en las muestras de hormigón nuevo y antiguo, después de 7 meses de exposición, la pérdida en las nuevas muestras fue mínima, con un promedio de 0,2 mm. Esto aumentó siguiendo una tendencia ligeramente acelerada y después de 19 y 31 meses de exposición, las pérdidas fueron de aproximadamente 8,5 mm y 24 mm respectivamente. También se registraron pérdidas significativas en las muestras de hormigón antiguo. Estas fueron evidentes desde el principio y aumentaron linealmente llegando a ser de 28,4 mm después de 31 meses de exposición.



PREDICCIÓN DE TASAS DE CORROSIÓN DEBIDAS A LA ACCIÓN DEL SULFURO DE HIDRÓGENO EN PUNTOS DE LA RED DE SANEAMIENTO DE LA REGIÓN DE MURCIA

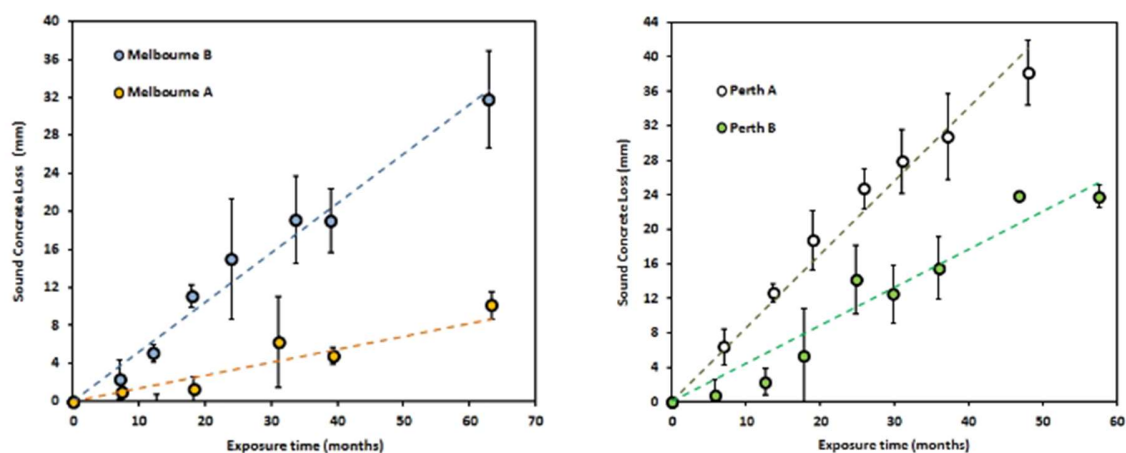


Los resultados de este estudio de la corrosión del hormigón nuevo y antiguo expuestos a un entorno de alcantarillado realista pero particularmente agresivo muestran que el hormigón nuevo pasa por 3 etapas, caracterizadas por la disminución de la alcalinidad superficial y el desarrollo del estado estacionario de corrosión a largo plazo. Los hormigones más antiguos mostraron un comportamiento de corrosión consistente con la etapa 3 del modelo. Como conclusión, los resultados pueden simplificarse a un modelo bilineal para la pérdida de hormigón por corrosión, con unos valores despreciables en el período inicial y una pérdida a velocidad constante después de la iniciación.



Cabe destacar que este tipo de estudios son relativamente comunes en Australia. A partir de Junio de 2010 se recogieron muestras en varios puntos del alcantarillado de Melbourne expuestas desde 7 hasta 63 meses a la acción del H<sub>2</sub>S. En cuatro de estos puntos, llamados Melbourne A y B y Perth A y B, las concentraciones medias de H<sub>2</sub>S oscilaron entre 400 ppm (Perth B) y aproximadamente 1,5 ppm (Melbourne A). Las temperaturas medias de los gases de alcantarillado de Perth (26-27 ° C) también fueron más altas (aproximadamente 6 ° C) que las observadas en Melbourne, mientras que la humedad media en las alcantarillas de Melbourne estuvo cerca de la saturación (RH > 97%) y en Perth, sin embargo, fue más seca (HR < 95%).

Los resultados referentes a las pérdidas registradas en las muestras de hormigón viejo fueron los siguientes:



**Determinación de los efectos a largo plazo de la concentración de H<sub>2</sub>S, la humedad relativa y la temperatura del aire en la corrosión de los alcantarillados de hormigón**

*(Guangming Jiang, Jurg Keller, Philip L. Bond, Universidad de Queensland, Australia, 2010)*

La Universidad de Queensland en Australia, a diferencia de otros centros que realizaron estudios sobre corrosión en condiciones aceleradas, investigó a partir del año 2010 los efectos de varios factores influyentes en este proceso durante más de 3 años y medio, bajo condiciones controladas, simulando el ambiente propio de un alcantarillado. Como ya se sabe la concentración de H<sub>2</sub>S en las alcantarillas reales varía mucho debido a los diferentes tiempos de retención hidráulica, velocidades de flujo y características de las

aguas residuales. Además de la alta humedad relativa y el alto contenido de oxígeno atmosférico, se estima que se necesita una concentración de H<sub>2</sub>S > 2 ppm para que la oxidación del sulfuro provoque corrosión en el hormigón (O'Dea, 2007). Se cree que la tasa de corrosión de las tuberías es directamente proporcional a la tasa de emisión de H<sub>2</sub>S (De Belie et al., 2004). El conocido **modelo de Pomeroy** puede usarse para **calcular la tasa de deterioro de las tuberías de alcantarillado de hormigón** basándose en la siguiente ecuación (Pomeroy, 1990):

$$C_r = \frac{11.5k\phi_{sw}}{alk}$$

Donde:

$C_r$  = Tasa de corrosión (mm/año)

$k$  = Factor relacionado con la formación de ácido, basado en las condiciones climáticas (0,8 en climas moderados)

$\phi_{sw}$  = Sulfuro en la fase aire-pared [g H<sub>2</sub>S / (m<sup>2</sup> hr)]

$alk$  = Alcalinidad del material de la tubería (g CaCO<sub>3</sub> / g de hormigón). Aproximadamente de 0,18 a 0,23 para hormigón granítico, 0,9 para agregado calcáreo, 0,4 para revestimientos de mortero y 0,5 para cemento de asbesto.

En el estudio de la Universidad de Queensland en Australia se controlaron, a distintos niveles, los factores de concentración de H<sub>2</sub>S, humedad relativa y temperatura del aire en las conducciones. 36 cámaras de corrosión fueron operadas durante 45 meses desde diciembre de 2009. Los factores ambientales fueron chequeados diariamente para asegurar el funcionamiento adecuado de las cámaras. Periódicamente, a intervalos de entre 6 y 10 meses, un conjunto de muestras (una muestra en fase gaseosa y una parcialmente sumergida), eran retiradas de cada una de las cámaras para realizar un análisis detallado del pH de la superficie, los niveles de sulfato de la capa de corrosión y la pérdida de hormigón. Los estudios determinaron que la velocidad de corrosión tanto de la fase gaseosa como parcialmente sumergidos estaba positivamente correlacionada con la concentración de H<sub>2</sub>S en la fase gaseosa.

Para la superficie del tubo más alejada del nivel del agua, la humedad relativa del aire de la alcantarilla y el proceso de condensación en la superficie del hormigón generaban una película de agua óptima para el crecimiento microbiano. Anteriormente, se informó de

que la humedad desempeña un papel en la neutralización de la superficie en la fase temprana de la corrosión del hormigón de alcantarillado (*Joseph et al., 2012*), sin embargo, aunque la humedad relativa desempeñó también un papel importante en el proceso de corrosión en la fase gaseosa en este estudio australiano, las muestras parcialmente sumergidas no se vieron afectados por la humedad ya que sus superficies estaban saturadas debido a la succión capilar de las aguas residuales. El efecto de la temperatura sobre la actividad de la corrosión fue variable y posiblemente la aclimatación de los microbios que inducen la corrosión a la temperatura mitigó los efectos de este factor.

Basándose en todas estas consideraciones y en el análisis estadístico, **se propusieron los siguientes modelos para estimar las tasas de corrosión:**

PSC (Muestras de hormigón **parcialmente sumergido**):

$$C_r = k \cdot C_{H_2S}^n + C_{ri}$$

GPC (Muestras de hormigón en **fase gaseosa**):

$$C_r = k \cdot C_{H_2S}^n \cdot f_{BET}(RH) + C_{ri}$$

Donde:

$C_r$  = Tasa de corrosión (mm/año)

$C_{H_2S}$  = Concentración de gas H<sub>2</sub>S

$k, n$  = Constantes del modelo estimadas a partir de los datos experimentales

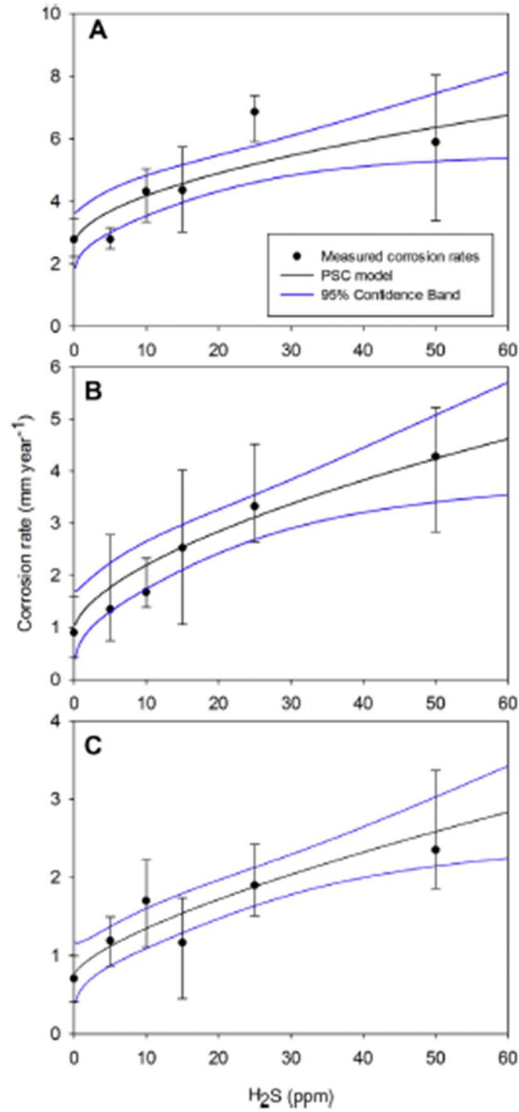
$C_{ri}$  = Corrosión causada por exposición previa

$f_{BET}(RH)$  = adsorción de BET (Brunauer-Emmett-Teller)

Para el modelo GPC, sólo se han examinado dos niveles de humedad relativa en los experimentos, lo que hace imposible validar este modelo. Sin embargo, el modelo de PSC se examinó mediante un ajuste de curva con los datos experimentales (mostrado más

PREDICCIÓN DE TASAS DE CORROSIÓN DEBIDAS A LA ACCIÓN DEL SULFURO DE HIDRÓGENO EN PUNTOS DE LA RED DE SANEAMIENTO DE LA REGIÓN DE MURCIA

abajo), siendo capaz de describir adecuadamente la relación entre las tasas de corrosión y las concentraciones de H<sub>2</sub>S.



Tasa de corrosión de las muestras de hormigón parcialmente sumergidas equipadas con el modelo PSC durante los meses 0-12 (A), 12-24 (B) y 24-45 (C).

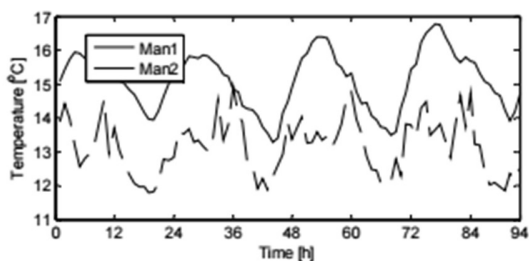
**Estudio sobre la influencia de temperatura, pH y H<sub>2</sub>S en la corrosión de tuberías de hormigón en el Reino Unido**

*(World Academy of Science, Engineering and Technology, Anna Romanova, Mojtaba Mahmoodian, Morteza A. Alani, 2014)*

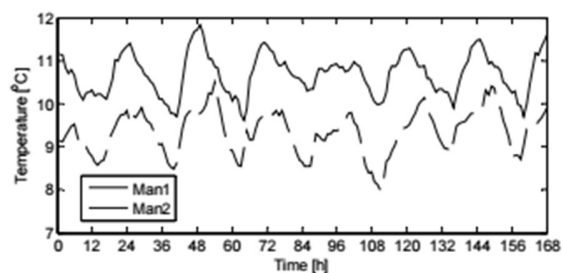
Para el estudio de la influencia de parámetros como la presencia de H<sub>2</sub>S, la temperatura o el pH en el proceso de corrosión de tuberías de hormigón se seleccionaron, durante el año 2014, dos pozos de acceso con tuberías de alcantarillado de hormigón conocidas por sufrir procesos de corrosión en Rochester y Maid Stone en el Reino Unido. En estos pozos se colocaron sensores de H<sub>2</sub>S y sensores de temperatura, capaces de determinar la temperatura del efluente, la temperatura ambiente y el pH del efluente.

Las conclusiones obtenidas de estos estudios fueron las siguientes:

- Existe relación entre la temperatura ambiente y la del efluente (siguen el mismo patrón horario)



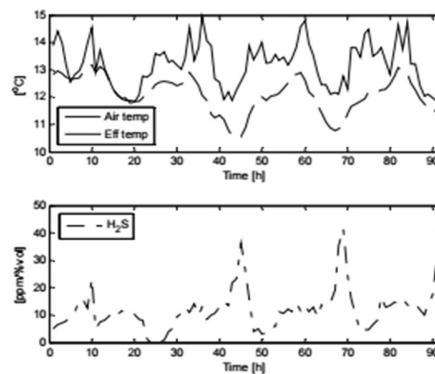
Temperatura del efluente en el pozo 1 y 2 durante un periodo de 4 días



Temperatura ambiente en el pozo 1 y 2 durante un periodo de 4 días

- El nivel de H<sub>2</sub>S alcanza su pico con la disminución de temperatura dentro de los pozos en las horas finales de la tarde y la madrugada (en momentos de poca actividad)

PREDICCIÓN DE TASAS DE CORROSIÓN DEBIDAS A LA ACCIÓN DEL SULFURO DE HIDRÓGENO EN PUNTOS DE LA RED DE SANEAMIENTO DE LA REGIÓN DE MURCIA



Temperaturas y concentración de sulfuro de hidrógeno en el pozo 1 durante un período de 4 días

- No hay influencia directa entre los valores de pH y la concentración de H<sub>2</sub>S
- La temperatura ambiente es influenciada por la temperatura del efluente
- Los patrones de temperatura por hora son independientes en cada pozo pero la tendencia general diaria es similar
- En promedio la temperatura del efluente es superior en 3,5 °C a la temperatura ambiente

Estudios previos llevados a cabo por distintos autores (*H. Satoh, M. Odagiri, J. Vollertsen, A. H. Nielsen, C. G. Jin and. D. L. Won*), ya habían determinado que la corrosión en las tuberías puede producir incrustaciones en las mismas y pérdida de la pared de la tubería. Estos estudios determinaron también que se produce una corrosión severa en puntos de alta turbulencia y liberación de H<sub>2</sub>S. El proceso de corrosión se acelera cuando:

- El pH en la superficie de la tubería cae por debajo de 4
- La temperatura se encuentra entre 10-30°C
- La concentración de H<sub>2</sub>S está entre 3-400 ppm



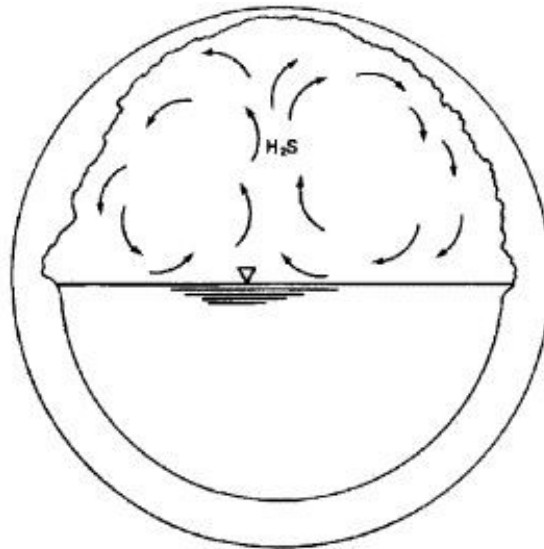
### **3. Control de olores y corrosión en sistemas sanitarios y plantas de tratamiento**

Desde hace varias décadas se han llevado a cabo un gran número de investigaciones sobre diversos aspectos del problema del sulfuro de hidrógeno en conducciones. Desde países como Estados Unidos (*Assessment of Needed Publicly-Owned Wastewater Treatment facilities in the United States*. Environmental Protection Agency, Washington, DC ), Australia (Thistlethwayte, D.K.B. *Control of Sulphides in Sewerage Systems.*) o Sudáfrica (*Corrosion of Concrete Sewers and Some Remedies*. South African Industrial Chemistry, Stutterheim, N., and J.H.P. VanAardt) se han aportado importantes contribuciones.

La necesidad de controlar el problema de corrosión y malos olores en los sistemas de alcantarillado hizo que en el año 1974 la EPA (Agencia de Protección Medioambiental de Estados Unidos) desarrollase el ***Manual de Diseño de Procesos para el Control de Sulfuros en Sistemas de Alcantarillado Sanitario (DM)***. Este manual de diseño supone una ayuda tanto a la hora de diseñar nuevos sistemas como cuando pretendemos controlar y optimizar los ya existentes, ya que reúne toda la información disponible de una forma conveniente.

En este manual se describe el H<sub>2</sub>S como el principal causante del mal olor y la corrosión en los sistemas de recolección y tratamiento de aguas residuales domésticas. Este gas tiene un olor a huevo podrido característico y es extremadamente tóxico y corrosivo. Además, la presencia de H<sub>2</sub>S puede favorecer la producción de otros compuestos orgánicos malolientes, por lo que, la solución de los problemas de olores debido a este compuesto a menudo puede ayudar a resolver otros problemas similares.

La oxidación del H<sub>2</sub>S en presencia de humedad es el principal agente causal del deterioro de la pared de la tubería. Esta corrosión no resulta ser uniforme debido a varios factores, que incluyen, las corrientes de aire, la migración de ácido sulfúrico por la pared del tubo y la exposición al agua.



Distribución de la corrosión de una tubería

### 3.1 Enfoque del problema de olor en sistemas ya existentes

Si encontramos los primeros indicios de problemas de **olor** en sistemas de recolección y tratamiento de aguas residuales, el **manual de diseño** expone que es necesario realizar un estudio capaz de identificar las fuentes y causas de la generación de esas condiciones. Para ello define un **protocolo de actuación** basado en los siguientes puntos:

Programa  
Preliminar de  
Monitoreo



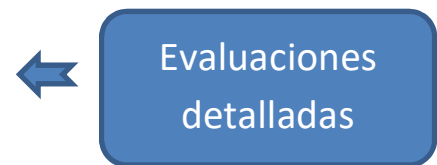
- Debe incluir una investigación sistemática del sistema de recolección y tratamiento.
- Se recolectan muestras de agua y aire en todas las zonas problemáticas para evaluar así la gravedad de los olores.

○ Con los datos preliminares se profundizan las investigaciones.

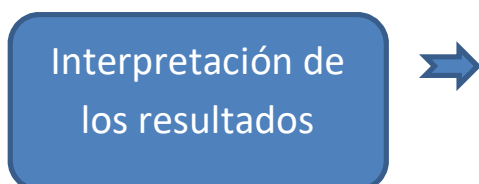
○ En las aguas residuales se analiza:

- Sulfatos
- pH
- Sulfuros disueltos
- Sulfuros totales
- Demanda

bioquímica de oxígeno ● Oxígeno disuelto ● Temperatura



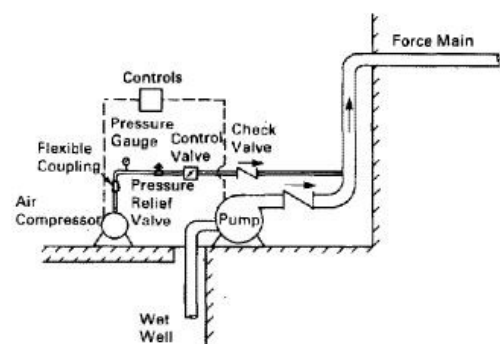
○ Los datos recopilados se utilizan en las decisiones de diseño de control de olores, como:



- Mejoras en las operaciones y el mantenimiento.
- Eliminación de una o más condiciones necesarias para la generación de H<sub>2</sub>S (alta temperatura, pH favorable,...)
- Inyección de aire comprimido u oxígeno puro.
- Uso de tratamientos químicos basados en la adicción de cloro, nitratos, iones metálicos,...

En muchos casos, las emisiones de olores se pueden reducir o eliminar mediante prácticas mejoradas de operación y mantenimiento. Limpieza periódica y frecuente de dispositivos de tratamiento preliminar, como trituradores, pantallas de barras,... limpieza de las paredes del tanque, eliminación de depósitos de lodos, aumento de la tasa de retirada de sólidos asentados son ejemplos de técnicas de operación y mantenimiento de rutina que son útiles para controlar los olores.

Cuando nos encontramos con altas concentraciones de sulfuro, mejorar el equilibrio de oxígeno mediante inyecciones es una de las técnicas más efectivas a la hora de prevenir y eliminar el sulfuro causante del mal olor de las conducciones. La presencia de más de 1,0 mg / l de oxígeno disuelto en la corriente de aguas residuales es suficiente para prevenir la acumulación de sulfuro, ya que cualquier sulfuro



Sistema de inyección directa de aire comprimido

que pueda producirse será oxidado aeróbicamente a tiosulfato. Sin sulfuros disueltos presentes en la corriente, no se producirá la emisión de H<sub>2</sub>S a la atmósfera del alcantarillado. Si decidimos **inyectar aire comprimido** a la red, podemos utilizar diversas técnicas:

- Inyección directa de aire comprimido.
- Uso de bombas elevadoras de aire.
- Uso de aspiradores de Venturi.
- Empleo de tubos de aireación en forma de U.

Otra opción posible y de demostrada eficacia es la **adición directa de oxígeno puro**. Este proceso se ha utilizado con relativa asiduidad en países como Reino Unido, Australia y Estados Unidos ( *Hollerbach, G.H. The Use of Molecular Oxygen for Hydrogen sulfide Control in Sanitary Sewage Systems.*). La adición de oxígeno puro tiene varias ventajas sobre la inyección de aire comprimido:

- El oxígeno es cinco veces más soluble en agua que el aire.
- Se deben inyectar cantidades menores de gas, lo que reduce la probabilidad de formación de bolsas de gas.
- No se requieren compresores.
- Una mayor solubilidad da como resultado una eficiencia de bombeo mejorada.

Resulta imprescindible en el diseño de un sistema de inyección, tanto de aire comprimido como de oxígeno puro, estimar las necesidades de gas que permitan lograr los objetivos deseados de control de sulfuros. Para esto es necesaria la recopilación de datos suficientes para estimar las tasas de reacción de oxígeno en el alcantarillado. Como enfoque alternativo a este, aparece la utilización de una serie de ecuaciones que nos permiten, de manera directa, valorar el flujo necesario de aire comprimido u oxígeno puro.

#### Aire comprimido:

$$Q_a = \frac{(6 \times 10^{-4})VR_r}{P_1 \log [(P_1 + P_2)/P]} \times \frac{u_a + u_w}{u_a}$$

(*Process Design Manual for Sulfide Control in Sanitary Sewerage Systems.*, U.S. Environmental Protection Agency, 1974.)

Q <sub>R</sub>	Flujo de aire requerido, m <sup>3</sup> /min.
V	Volumen a la presión principal, m <sup>3</sup> .
R <sub>r</sub>	Tasa de pérdida de oxígeno, mg/l-hr.
P <sub>1</sub>	Presión atmosférica ambiental, atm.
P <sub>2</sub>	Presión de calibración en el punto de inyección, atm.
u <sub>a</sub>	Velocidad del aire en las aguas residuales, m/s.
u <sub>w</sub>	Velocidad de las aguas residuales, m/s.

Oxígeno puro:

$$C_o = R_r + \frac{280}{d} (0.785 d^2) \times \frac{L}{F} \times 10^{-4}$$

- C<sub>o</sub> Concentración de oxígeno requerida, mg / l.
- R<sub>r</sub> Tasa de reacción de oxígeno, mg / l.
- d Diámetro de tubería, cm.
- L Longitud de tubería, m.
- F Descarga, m<sup>3</sup>, hr.

(Boon. A.G.. and A.R. Lister. *Formation of Sulphide In Rising Main Sewers and Its Prevention by Injection of Oxygen*, 1975.)

Como he mencionado anteriormente las zonas turbulentas pueden hacer que se desprenda H<sub>2</sub>S a la atmósfera del alcantarillado. Por esta razón, el oxígeno puede ser inyectado eficientemente en una caída hidráulica debido a la mezcla intensa y la turbulencia resultante de tales estructuras.

Por último, como alternativa a la inyección de aire comprimido u oxígeno puro para controlar la aparición de H<sub>2</sub>S, existen numerosos productos químicos igualmente eficaces a la hora de frenar este proceso. La **adición química** puede controlar sulfuros mediante:

Oxidación química	Inhibición de la reducción de sulfato	Precipitación	Controladores de pH
<p>- <math>Cl_2, H_2O_2</math></p> <p>- Si se añade <b>cloro</b> en exceso a un agua residual que contiene sulfuro, <b>el sulfuro se oxida a sulfato</b>.</p> <p>- Un estudio llevado a cabo en Florida (Baker, J.L. <i>Study of Hydrogen Sulfide Control in Wastewater</i>) observó que a dosis medias de cloro <b>las concentraciones de sulfuro se reducían a cero</b> en un punto a 6,5 kms aguas abajo del punto de inyección.</p>	<p>- <math>NO_3^-</math></p> <p>- El nitrato se puede agregar como una <b>fuerza suplementaria de oxígeno para controlar los sulfuros</b> en los sistemas de recogida de aguas residuales.</p> <p>- <b>No se producirá reducción de sulfato</b> hasta que se haya reducido todo el nitrato.</p>	<p>- <b>Sales metálicas.</b></p> <p>- Las sales de muchos metales <b>reaccionarán con sulfuro disuelto para formar precipitados metálicos</b> de sulfuro, evitando así la liberación de H<sub>2</sub>S a la atmósfera.</p> <p>- Una mezcla de sulfato férrico y ácido nítrico <b>puede llegar a ser más rentable que la utilización de peróxido de hidrógeno o la adición de nitrato.</b></p>	<p>- <b>Bases fuertes.</b></p> <p>- <b>Aumentar el pH reduce la proporción de H<sub>2</sub>S disuelto</b>, manteniendo los sulfuros disueltos en la forma <math>HS^-</math>.</p> <p>- <b>La adición continua de bases fuertes</b> para el mantenimiento de un alto pH generalmente <b>no es práctica</b> en sistemas de recolección</p>

### 3.2 Enfoque del problema de la corrosión en sistemas nuevos

Como ya he mencionado, la corrosión es un problema omnipresente en muchos sistemas de recolección y tratamiento de aguas residuales. Su prevención resulta vital y puede dar lugar a un ahorro significativo de costes.

#### Predicción de acumulación de sulfuro y corrosión en los alcantarillados

La predicción de la tasa de acumulación de sulfuro y corrosión potencial es un elemento esencial en el diseño de sistemas de alcantarillado. Se han desarrollado muchas ecuaciones con este fin, sin embargo, se debe tener en cuenta que varios de los coeficientes se determinan empíricamente y variarán significativamente de una conducción a otra.

- Predicción de la acumulación de sulfuro en tuberías que no fluyen llenas

Encontramos un elevado número de ecuaciones para predecir la acumulación de sulfuros en este tipo de tuberías. Entre ellas una de las más utilizadas es la desarrollada por Pomeroy y Parkhurst, que tiene en cuenta diversos factores que afectan la acumulación de sulfuro en tuberías que fluyen menos que llenas:

$$\frac{d[S]}{dt} = \frac{M' \text{ EBOD}}{R} - \frac{m [S](su)^{3/8}}{d_m}$$

Dónde:

$\frac{d[S]}{dt}$	= tasa de cambio del sulfuro total, mg / l-hr dt.
$M'$	= Coeficiente de flujo de sulfuro, constante empírica determinada experimentalmente, m / h.
$\text{EBOD}$	= Demanda bioquímica de oxígeno efectiva, mg/l.
$T$	= temperatura de las aguas residuales, ° C.
$R$	= Radio hidráulico, m.
$m$	= coeficiente empírico que tiene en cuenta las pérdidas de sulfuros por oxidación y escape a la atmósfera.
$[S]$	= concentración total de sulfuro, mg / l.
$d_m$	= Profundidad media, m.
$u$	= velocidad media de las aguas residuales, m / s.
$s$	= pendiente, m / m.

- Predicción de la acumulación de sulfuro en tuberías que fluyen llenas

En el caso de tuberías llenas, se puede partir también de la ecuación de Pomeroy y Parkhurst, con algunas modificaciones. En este tipo de conducciones se minimiza, o incluso elimina, la reaireación superficial, la oxidación de sulfuros y las pérdidas de sulfuro a la atmósfera del alcantarillado. Esto hace que el término de la derecha de la ecuación pueda ser despreciado, apareciendo una nueva expresión que tiene en cuenta la generación de sulfuro en la corriente.

$$\frac{d[S]}{dt} = M \left[ EBOD \left( \frac{4}{d} + 1.57 \right) \right]$$

Dónde:

$\frac{d[S]}{dt}$	= tasa de cambio del sulfuro total, mg / l-hr dt.
M	= coeficiente de flujo de sulfuro para tubería llena, constante empírica determinada experimentalmente, m/h.
EBOD	= Demanda bioquímica de oxígeno efectiva, mg/l.
d	= diámetro de tubería, m.

Es importante también tener en cuenta que la existencia de uniones y afluentes en la red de alcantarillado puede causar cambios en la calidad del agua residual que afecten a la generación de sulfuro en la red. Las uniones turbulentas pueden desprender H<sub>2</sub>S a la atmósfera del alcantarillado por lo que estas deben estar diseñadas para minimizar la turbulencia y evitar así problemas de olor y corrosión en esos puntos.

Las distintas zonas de una tubería se someten alternativamente a condiciones húmedas y secas así como a fluctuaciones en las temperaturas ambiente. El agua puede hidrolizar ciertos componentes de la pintura, lo que disminuye tanto la resistencia como la adhesión del recubrimiento. Además, puede disminuir la resistencia de este recubrimiento al paso de gases como el H<sub>2</sub>S, que resultan corrosivos para el material subyacente.

A la hora de **predecir las tasas de corrosión** en una tubería, **en primera instancia**, surge una ecuación capaz de **predecir el declive del sulfuro en una corriente** debido a la pérdida de H<sub>2</sub>S a la atmósfera, desarrollada por Pomeroy:

$$R_{sf} = \frac{\Phi_{sf}}{d_m}$$

Donde:

$R_{sf}$  = Agotamiento de sulfuro en la corriente debido al escape de H<sub>2</sub>S, mg / l-h

$d_m$  = Profundidad hidráulica media (definida como el área de la sección transversal de la corriente dividida por su anchura superficial), m

$\Phi_{sf}$  = Flujo de H<sub>2</sub>S de la superficie de la corriente, gramos de sulfuro por m<sup>2</sup>-h

El flujo  $\Phi_{sf}$ , bajo condiciones típicas de alcantarillado, excluyendo corrientes poco profundas, de alta velocidad o cualquier punto de alta turbulencia, viene definido por la siguiente ecuación:

$$\Phi_{sf} = 0.69(su)^{3/8}j [DS]$$

Donde:

$s$  = Pendiente de la línea de grado energético de la corriente, m / m

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

$j$  = Proporción de sulfuro disuelto presente como H<sub>2</sub>S

[DS] = Concentración de sulfuro disuelto en las aguas residuales, mg / l

**En segundo lugar**, si se supone que **todo el H<sub>2</sub>S que escapa a la atmósfera de la alcantarilla se oxida** en la pared de la tubería, **el flujo promedio de sulfuro a la pared** puede calcularse multiplicando el flujo de sulfuro de la superficie por la relación entre el ancho de la superficie y el perímetro de la pared expuesta:

$$\Phi_{sw} = 0.69(su)^{3/8}j [DS] \left( \frac{b}{P'} \right)$$



Donde:

$\phi_{sw}$  = Flujo de H<sub>2</sub>S a la pared del tubo, g / m<sup>2</sup> -hr

$\left(\frac{b}{P}\right)$  = Relación de la anchura de la corriente de aguas residuales en la superficie y el perímetro expuesto de la pared de la tubería por encima de la superficie del agua

**Por último**, la velocidad de corrosión de los tubos de cemento puede presentarse teóricamente mediante ecuaciones. La velocidad de corrosión depende de la velocidad de producción de ácido sulfúrico y de la alcalinidad del material de la tubería. La producción de ácido sulfúrico está relacionada con la emisión masiva de sulfuro de las aguas residuales. La velocidad de corrosión de la tubería unida al cemento se puede estimar asumiendo la velocidad a la cual el H<sub>2</sub>S alcanzará la pared de la tubería y la cantidad que alcanzará la pared que será oxidada y disponible para la reacción. Para esto se puede utilizar la **ecuación de tasa de corrosión de Pomoroy** que ya expusimos anteriormente y cuyo resultado nos proporciona la tasa media de penetración en mm / año:

$$C_r = \frac{11.5k\phi_{sw}}{alk}$$

#### Técnicas de control de la corrosión en sistemas de alcantarillado

Existe una importante variedad de métodos para controlar la corrosión en los sistemas de tratamiento de aguas residuales. Las alternativas más comúnmente empleadas, son:

- **Adición de productos químicos**

De igual forma que para controlar los olores, la acción de los productos químicos sobre el H<sub>2</sub>S da como resultado la oxidación, precipitación o inhibición de la formación de sulfuros. Los productos químicos anteriormente mencionados, que incluían peróxido de hidrógeno, sales metálicas, nitratos, cloro,... se han encontrado igualmente eficaces para el control de la corrosión debida a la acción de sulfuros.

- **Hormigón polímero**

El hormigón polímero es utilizado en tuberías de pequeños diámetros. Algunas de las características mecánicas de estos hormigones son mayores a las del hormigón convencional, sin embargo resultan muy costosos (Joorabchian, 2010).

La efectividad de la adición del polímero se ha demostrado en algunas investigaciones, dando resultados de espesores de tubería y pérdida de peso de la misma un 1% menor que las del hormigón de referencia (Vincke et al., 2002)

- **Recubrimientos protectores**

El uso de recubrimientos ha demostrado una notable efectividad frente a la acción del ácido sulfúrico. Los recubrimientos epóxidos y los revestimientos con poliuria presentan una gran protección si se compara con el recubrimiento de cemento, el cual registra una gran pérdida de masa (De Muynck et al., 2009).

El problema con el uso de recubrimientos y revestimientos es el incremento económico que suponen. A pesar de que dependen del tipo de recubrimiento y el espesor de la capa, se estima que el coste es de dos a tres veces mayor que el de una tubería de hormigón convencional (Joorabchian, 2010; Vincke, 2002).

- **Métodos antimicrobianos**

El uso de recubrimientos antimicrobianos, como óxidos metálicos o aditivos que buscan reducir o eliminar la actividad de los diversos microorganismos presentes en los colectores de aguas residuales, es un campo de investigación relativamente nuevo. Se han realizado experimentos obteniendo cierta inhibición de la actividad microbiana cuando los cultivos de *Thiobacillus* son expuestos a hormigón con adición de formiato de calcio en la mezcla (Yamanaka et al., 2002).

La corrosión generada en los elementos de hormigón por la acción del ácido sulfúrico es un proceso complejo y a pesar de que se realizan muchas investigaciones referentes a este problema, no se ha podido establecer un mecanismo que controle por completo todas las variables que inciden en dicho problema y lo mitiguen realmente. Las técnicas antimicrobianas son las más efectivas ya que atacan directamente a las bacterias, sin embargo por ser un campo estudiado recientemente, los resultados no son del todo fiables, ya que hacen falta más estudios sobre el incremento de costes y las afectaciones que podrían tener sobre el ambiente y la salud humana.

#### Diseño para evitar el olor y la corrosión en nuevos sistemas de recolección de aguas residuales

El potencial de generación de sulfuro y olor en los nuevos sistemas de alcantarillado debe ser evaluado en su totalidad en la etapa de diseño en base a las características y propiedades de los compuestos que causan estos problemas. Las temperaturas cálidas o la topografía plana son condiciones físicas que, a menos que se considere específicamente durante el diseño, es probable que presenten en el futuro problemas de olores y corrosión a causa de sulfuros. Para eliminar o minimizar la generación de H<sub>2</sub>S en el diseño de

nuevos sistemas de recogida de aguas residuales se deben tener en cuenta las siguientes consideraciones:



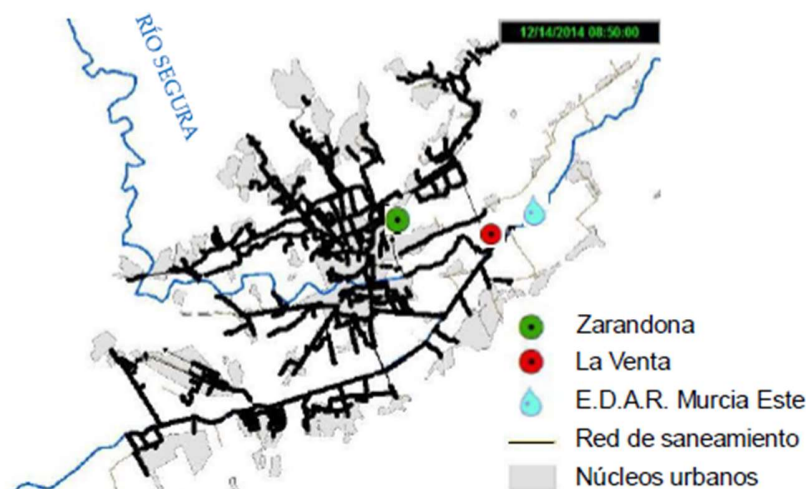
Aparte de esto habrá que tener cuidado también a la hora de diseñar métodos de bombeo y sistemas de ventilación de las alcantarillas. Estos últimos resultan de vital importancia, ya que el control de los olores es prácticamente alcanzable mediante la ventilación. Esta permite:

- Aumentar el contenido de oxígeno en la atmósfera del alcantarillado.
- Reducir las concentraciones de H<sub>2</sub>S en la atmósfera.
- Mantener secas las paredes de alcantarillas y otras estructuras (evitando los condensados corrosivos).
- Proporcionar un ambiente seguro dentro de las alcantarillas.

La ventilación se puede conseguir por medios naturales y mecánicos. Prácticamente todas las alcantarillas incorporan algún método de ventilación natural. La ventilación mecánica, por el contrario, se emplea normalmente sólo en respuesta a las quejas de las emisiones de olor de alguna parte del sistema de recogida original.

#### **4. Predicción de tasas de corrosión en la red de saneamiento de la Región de Murcia**

El propósito de este trabajo fin de grado ha sido el de utilizar las distintas ecuaciones y modelos existentes vistos con anterioridad para calcular las tasas de corrosión previstas en un sistema de alcantarillado real. Para ello se ha recurrido a dos puntos concretos de la red de saneamiento de la ciudad de Murcia, denominados Zarandona y La Venta. Se trata de dos puntos situados en la zona media y final de la red de saneamiento, previos a su descarga en la EDAR de Murcia Este.



En el primer punto, la conducción es un túnel hecho con dovelas de hormigón armado de 2.80 m de diámetro y pendiente aproximada de 0.002 m/m. En el caso de La Venta se encuentra en el denominado colector de la margen izquierda de 2.00 m de diámetro y de pendiente aproximada de 0.002 m/m, situado cerca de la entrada a la planta de tratamiento.

La campaña experimental llevada a cabo en los puntos de Zarandona y La Venta tuvo lugar en el periodo de septiembre a noviembre de 2016. Consistió en la toma de muestras del agua residual sobre las que se cuantificaba el contenido total de sulfuros solubles en ácido a partir de la metodología del azul de metileno. Los sulfuros reaccionan con dimetil p-fenilendiamina en presencia de cloruro férrico para producir azul de metileno. La campaña de muestras puntual se llevó a cabo siempre en horario de 10:00 a 14:00 horas.



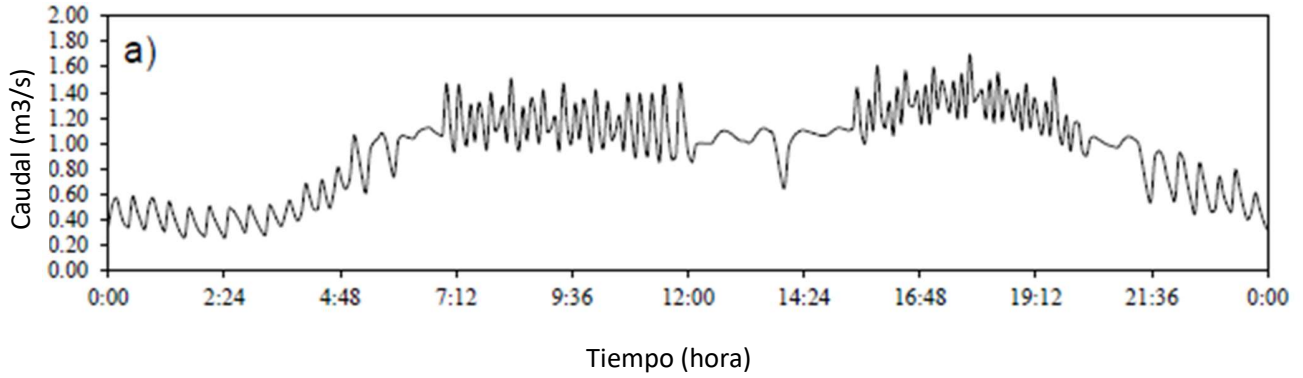
En la zona de medida se dispusieron además una serie de sondas que caracterizan diversas propiedades fisicoquímicas y eléctricas de las aguas residuales como el oxígeno disuelto en el agua residual, el potencial de oxidación-reducción (ORP), la conductividad eléctrica (EC), la temperatura (T), el grado de acidez o basicidad (pH) y los sólidos totales disueltos (TDS) en ambos puntos.



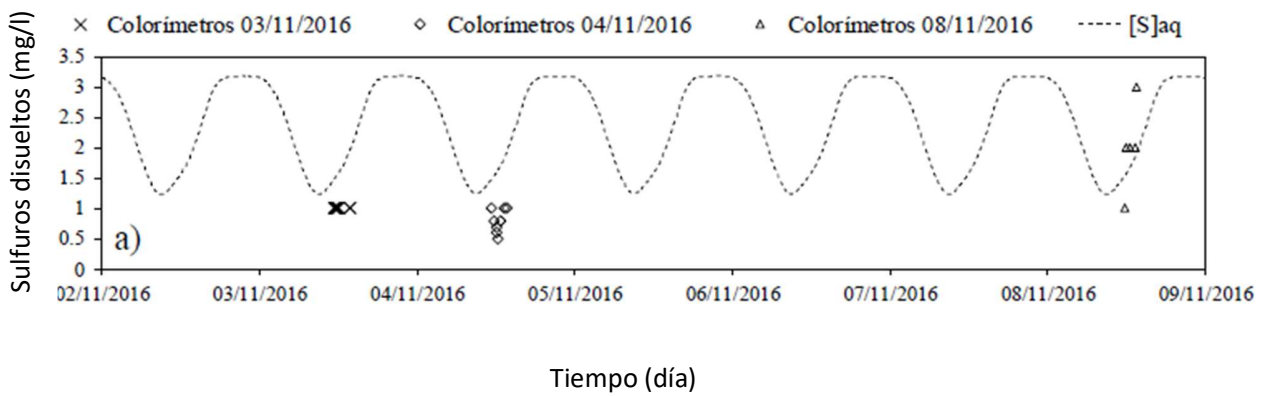
Por último, en los pozos de registro cercanos a la zona de medida se dispusieron dos medidores en continuo de ácido sulfhídrico en la atmósfera de los colectores con rango de medida de 0-1000 ppm y con resolución de 1 ppm. Dichos equipos tienen una autonomía en cuanto a su batería de más de 20 días y se encargan además de registrar la temperatura en la atmósfera del colector. En dicho estudio se registró una medida cada 5 minutos.

Los resultados obtenidos de caudal circulante en La Venta, sulfuros disueltos y Sulfhídrico en atmósfera, para ambas conducciones, se muestran en las siguientes figuras.

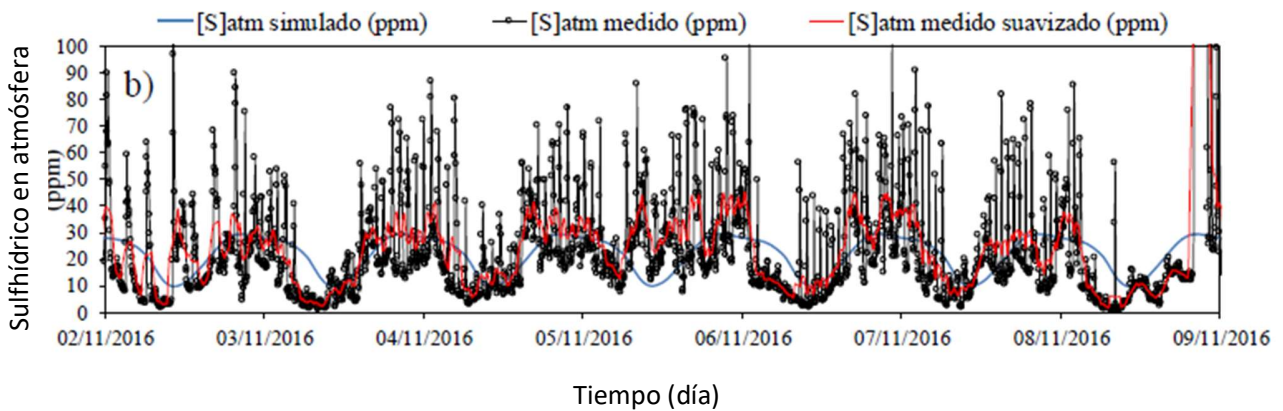
**Caudal La Venta**



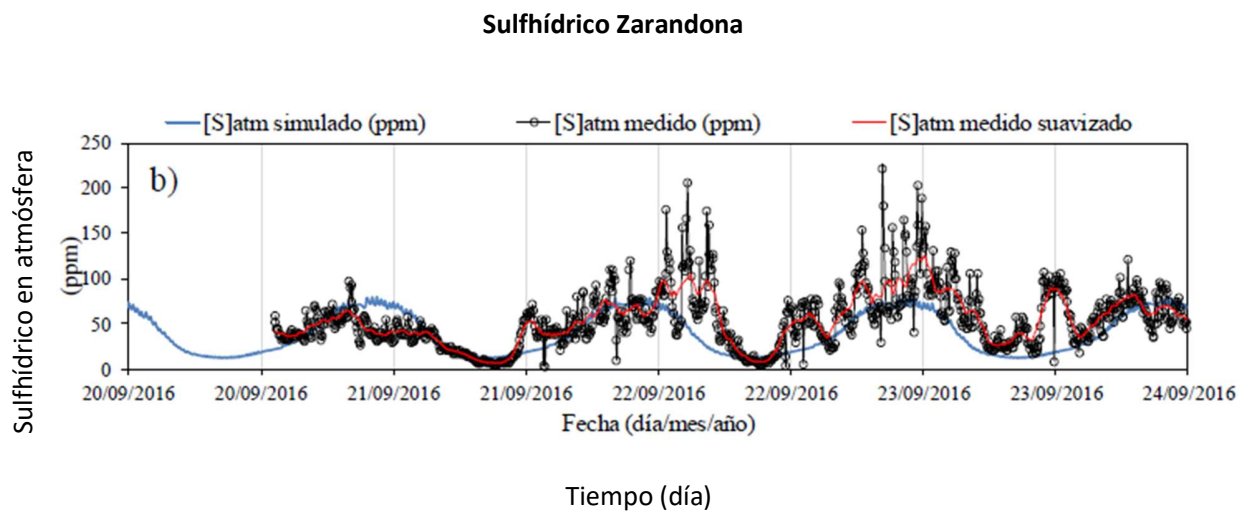
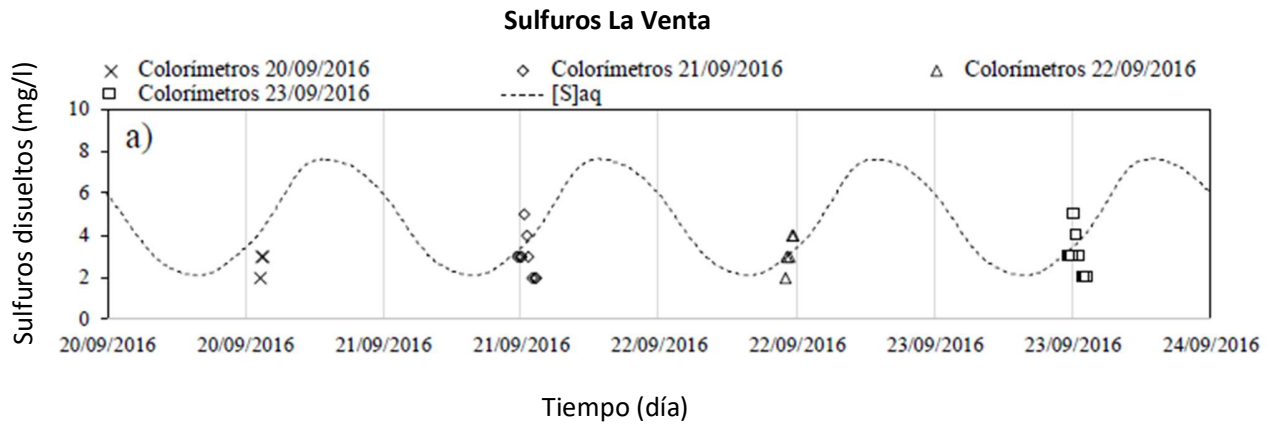
**Sulfuros Zarandona**



**Sulfhídrico Zarandona**



PREDICCIÓN DE TASAS DE CORROSIÓN DEBIDAS A LA ACCIÓN DEL SULFURO DE HIDRÓGENO EN PUNTOS DE LA RED DE SANEAMIENTO DE LA REGIÓN DE MURCIA



Tras digitalizar estas gráficas hemos obtenido los siguientes valores promedio, que utilizaremos para nuestros cálculos posteriores:

	Zarandona		La Venta	
<b>Caudal (m3/s)</b>	1,015825		1,015825	
<b>Sulfuros disueltos (mg/l)</b>	<b>Día 1</b>	2,40389792	<b>Día 1</b>	4,74828583
	<b>Día 2</b>	2,42576438	<b>Día 2</b>	4,7365376
	<b>Día 3</b>	2,41885083		
	<b>Día 4</b>	2,42092625	<b>Día 3</b>	4,74874855
	<b>Día 5</b>	2,42560854		
	<b>Día 6</b>	2,42007854		
		<b>Día 7</b>	2,41200354	<b>Día 4</b>
<b>Sulfhídrico en atmósfera (ppm)</b>	<b>Día 1</b>	22,2779688	<b>Día 1</b>	22,0427484
	<b>Día 2</b>	18,8685063	<b>Día 2</b>	41,6722634
	<b>Día 3</b>	24,4165833		
	<b>Día 4</b>	30,6202938	<b>Día 3</b>	65,8518257
	<b>Día 5</b>	22,4076438		
	<b>Día 6</b>	22,0444271		
		<b>Día 7</b>	25,9292313	<b>Día 4</b>

Con estos datos obtenidos podemos iniciar los cálculos para determinar cuáles serán las tasas de corrosión esperadas en cada uno de estos dos puntos de la red de alcantarillado de Murcia. Utilizaremos dos ecuaciones para este fin; La ecuación teórica de predicción de la tasa de corrosión de Pomeroy (1977) y una ecuación más reciente desarrollada por la organización australiana *Sewer Corrosion & Odour Research (SCORE)*.

<b>Ecuación de Pomeroy</b>
----------------------------

El modelo de Pomeroy permite saber cuál será la pérdida de hormigón debida a la acción del sulfuro de hidrógeno mediante la siguiente expresión:

$$Tasa\ de\ corrosión = C_{avg} = \frac{11,5K\phi_{sw}}{ALK}$$

Donde:

$C_r$  = Tasa de corrosión (mm/año)

$k$  = Factor relacionado con la formación de ácido, basado en las condiciones climáticas (0,8 en climas moderados)

$\phi_{sw}$  = Sulfuro en la fase aire-pared [g H<sub>2</sub>S / (m<sup>2</sup> hr)]



*alk*= Alcalinidad del material de la tubería (g CaCO<sub>3</sub> / g de hormigón). Aproximadamente de 0,18 a 0,23 para hormigón granítico, 0,9 para agregado calcáreo, 0,4 para revestimientos de mortero y 0,5 para cemento de asbesto.

El primer paso para la resolución de la misma será calcular los valores del calado (*y*) y la velocidad del agua, a partir de la ecuación de Manning, partiendo del caudal conocido. Para poder resolver la ecuación de Pomeroy necesitamos además conocer los siguientes parámetros:

*b*= Anchura de la corriente.

$\Theta$ = Ángulo del agua.

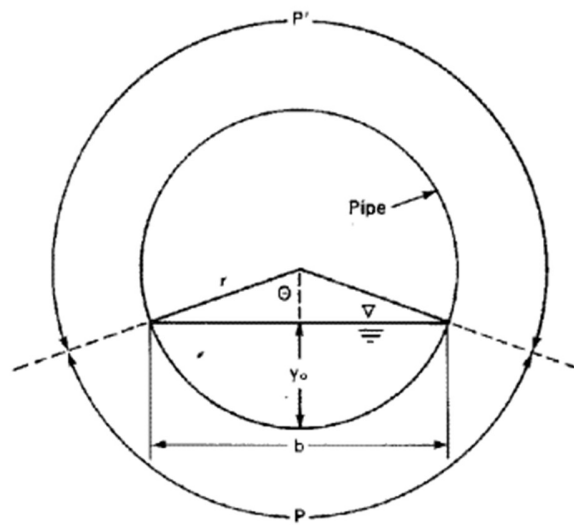
*A*= Área.

*P*= Perímetro mojado.

*R*= Radio hidráulico.

*P'*= Perímetro seco.

Para estos cálculos hemos recurrido a las siguientes ecuaciones:



$$R = \frac{AREA}{P}$$

$$AREA = 3,14r^2 \left( \frac{\theta}{180} \right) - (b/2)(r - y)$$

$$\theta = \cos^{-1} \frac{(r - y)}{r}$$

$$b = 2[r^2 - (r - y)^2]^{0,5}$$

$$P = 2(3,14)(r)(\theta/180)$$

$$P' = 2(3,14)r - P$$

Con lo que ya podremos calcular el flujo de H<sub>2</sub>S de la superficie de la corriente:

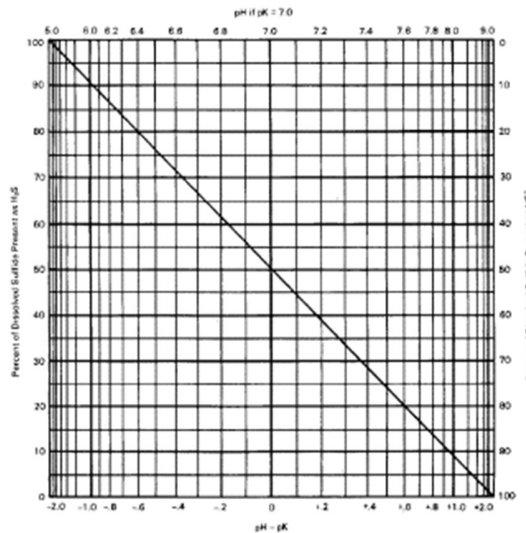
$$\phi_{sf} = 0.69(su)^{3/8}j [DS]$$

Donde:

$s$  = Pendiente de la línea de grado energético de la corriente, m / m, en nuestro caso 0,002

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

$j$  = Proporción de sulfuro disuelto presente como H<sub>2</sub>S, en nuestro caso 0,5, obtenido a partir de la siguiente gráfica:



[DS] = Concentración de sulfuro disuelto en las aguas residuales, mg / l

Y, por último, la tasa de corrosión, para la que supondremos:

$k$  = Factor relacionado con la formación de ácido, basado en las condiciones climáticas = 0,8 (climas moderados).

$alk$  = Alcalinidad del material de la tubería = 0,2 (hormigón granítico).

Los resultados obtenidos con el método Pomeroy, tanto en el punto Zarandona como en La Venta, se muestran a continuación:

MARIO DRIÉGUEZ CASTAÑO

PREDICCIÓN DE TASAS DE CORROSIÓN DEBIDAS A LA ACCIÓN DEL SULFURO DE HIDRÓGENO EN PUNTOS DE LA RED DE SANEAMIENTO DE LA REGIÓN DE MURCIA

**Zarandona (Día 1)**

Promedio sulfuro	Calado (y) (m)	Velocidad (m/s)	radio (m)	b (m)	$\theta$ (grados)	Área (m <sup>2</sup> )	P (m)	P' (m)	j
2,40389792	0,468	1,498	1,4	2,0893789	48,2628532	0,67651	2,3573723	6,43462775	0,5

pH=7

k	alk	s	$\phi_{sw}$	Tasa de corrosión (mm/año)
0,8	0,2	0,002	0,030474182	<b>1,40181</b>

**Zarandona (Día 2)**

Promedio sulfuro	Calado (y) (m)	Velocidad (m/s)	radio (m)	b (m)	$\theta$ (grados)	Área (m <sup>2</sup> )	P (m)	P' (m)	j
2,42576438	0,468	1,498	1,4	2,0893789	48,2628532	0,67651	2,3573723	6,43462775	0,5

pH=7

k	alk	s	$\phi_{sw}$	Tasa de corrosión (mm/año)
0,8	0,2	0,002	0,030751383	<b>1,41456</b>

**Zarandona (Día 3)**

Promedio sulfuro	Calado (y) (m)	Velocidad (m/s)	radio (m)	b (m)	$\theta$ (grados)	Área (m <sup>2</sup> )	P (m)	P' (m)	j
2,41885083	0,468	1,498	1,4	2,0893789	48,2628532	0,67651	2,3573723	6,43462775	0,5

k	alk	s	$\phi_{sw}$	Tasa de corrosión (mm/año)
0,8	0,2	0,002	0,03066374	<b>1,41053</b>

**Zarandona (Día 4)**

Promedio sulfuro	Calado (y) (m)	Velocidad (m/s)	radio (m)	b (m)	$\theta$ (grados)	Área (m <sup>2</sup> )	P (m)	P' (m)	j
2,42092625	0,468	1,498	1,4	2,0893789	48,2628532	0,67651	2,3573723	6,43462775	0,5

k	alk	s	$\phi_{sw}$	Tasa de corrosión (mm/año)
0,8	0,2	0,002	0,03069005	<b>1,41174</b>

PREDICCIÓN DE TASAS DE CORROSIÓN DEBIDAS A LA ACCIÓN DEL SULFURO DE HIDRÓGENO EN PUNTOS DE LA RED DE SANEAMIENTO DE LA REGIÓN DE MURCIA

**Zarandona (Día 5)**

Promedio sulfuro	Calado (y) (m)	Velocidad (m/s)	radio (m)	b (m)	$\theta$ (grados)	Área (m2)	P (m)	P' (m)	j
2,42560854	0,468	1,498	1,4	2,0893789	48,2628532	0,67651	2,3573723	6,43462775	0,5

k	alk	s	$\bar{O}_{sw}$	Tasa de corrosión (mm/año)
0,8	0,2	0,002	0,030749408	1,41447

**Zarandona (Día 6)**

Promedio sulfuro	Calado (y) (m)	Velocidad (m/s)	radio (m)	b (m)	$\theta$ (grados)	Área (m2)	P (m)	P' (m)	j
2,42007854	0,468	1,498	1,4	2,0893789	48,2628532	0,67651	2,3573723	6,43462775	0,5

k	alk	s	$\bar{O}_{sw}$	Tasa de corrosión (mm/año)
0,8	0,2	0,002	0,030679304	1,41125

**Zarandona (Día 7)**

Promedio sulfuro	Calado (y) (m)	Velocidad (m/s)	radio (m)	b (m)	$\theta$ (grados)	Área (m2)	P (m)	P' (m)	j
2,41200354	0,468	1,498	1,4	2,0893789	48,2628532	0,67651	2,3573723	6,43462775	0,5

k	alk	s	$\bar{O}_{sw}$	Tasa de corrosión (mm/año)
0,8	0,2	0,002	0,030576937	1,40654

Como se puede observar en el siguiente gráfico, la tasa de corrosión en Zarandona muestra un valor prácticamente constante a lo largo de toda la semana.



PREDICCIÓN DE TASAS DE CORROSIÓN DEBIDAS A LA ACCIÓN DEL SULFURO DE HIDRÓGENO EN PUNTOS DE LA RED DE SANEAMIENTO DE LA REGIÓN DE MURCIA

**La Venta (Día 1)**

Promedio sulfuro	Calado (y) (m)	Velocidad (m/s)	radio (m)	b (m)	θ (grados)	Área (m2)	P (m)	P' (m)	j
4,748285833	0,522	1,556	1	1,7567197	61,44513986	0,6520203	2,1437527	4,13624734	0,5

pH=7

k	alk	s	Ø <sub>sw</sub>	Tasa de corrosión (mm/año)
0,8	0,2	0,002	0,07986229	<b>3,67367</b>

**La Venta (Día 2)**

Promedio sulfuro	Calado (y) (m)	Velocidad (m/s)	radio (m)	b (m)	θ (grados)	Área (m2)	P (m)	P' (m)	j
4,736537603	0,522	1,556	1	1,7567197	61,44513986	0,6520203	2,1437527	4,13624734	0,5

pH=7

k	alk	s	Ø <sub>sw</sub>	Tasa de corrosión (mm/año)
0,8	0,2	0,002	0,079664694	<b>3,66458</b>

**La Venta (Día 3)**

Promedio sulfuro	Calado (y) (m)	Velocidad (m/s)	radio (m)	b (m)	θ (grados)	Área (m2)	P (m)	P' (m)	j
4,748748548	0,522	1,556	1	1,7567197	61,44513986	0,6520203	2,1437527	4,13624734	0,5

k	alk	s	Ø <sub>sw</sub>	Tasa de corrosión (mm/año)
0,8	0,2	0,002	0,079870072	<b>3,67402</b>

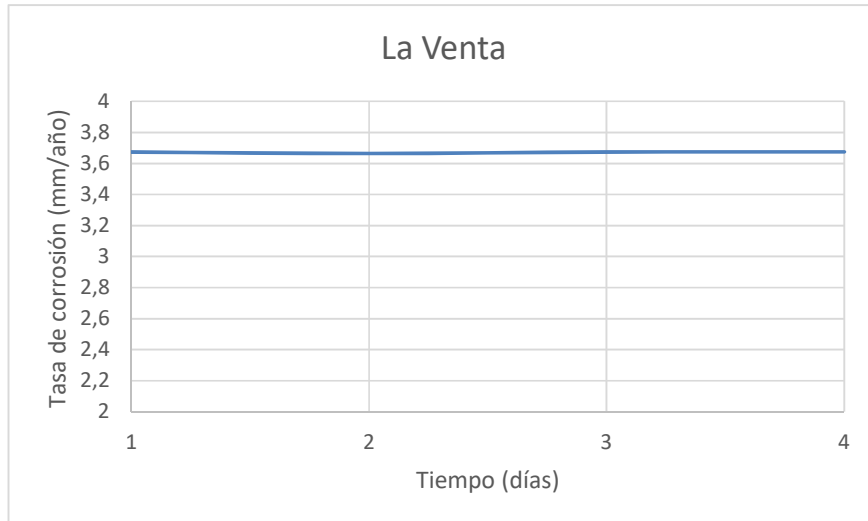
**La Venta (Día 4)**

Al igual que pasaba en Zarandona, apenas hay variaciones en la tasa de corrosión

Promedio sulfuro	Calado (y) (m)	Velocidad (m/s)	radio (m)	b (m)	θ (grados)	Área (m2)	P (m)	P' (m)	j
4,750356017	0,522	1,556	1	1,7567197	61,44513986	0,6520203	2,1437527	4,13624734	0,5

k	alk	s	Ø <sub>sw</sub>	Tasa de corrosión (mm/año)
0,8	0,2	0,002	0,079897109	<b>3,67527</b>

calculada mediante la ecuación de Pomeroy durante los cuatro días que se recogieron datos en La Venta.



#### Ecuación de SCORE

La asociación australiana SCORE expuso muestras de hormigón nuevo y corroído previamente durante 5 años en alcantarillas en toda Australia. Las pérdidas de corrosión en cada sitio siguieron una tendencia bilineal. Durante una fase inicial (duración <3 años) se producía una pérdida insignificante de material, sin embargo, una vez que la superficie alcanzaba un pH = 6 las pérdidas comenzaban y se acumulaban linealmente a una velocidad constante con el tiempo. Con esto, se desarrolló un modelo para predecir la tasa de corrosión usando condiciones ambientales locales. La ecuación resultante de este estudio es la siguiente:

$$CR \left( \frac{mm}{año} \right) = 458000 \times [H_2S]^{0,5} \times \frac{(1 - 0,01245 \times RH\%)}{(0,0955 \times RH\% - 9,8044)} \times e^{\left( -\frac{30000}{8,314 \times (T+273)} \right)}$$

Donde:

$[H_2S]$  = Concentración de  $H_2S$  en la atmósfera de la tubería (ppm)

$RH\%$  = Humedad relativa en la atmósfera de la tubería

$T$  = Temperatura en la atmósfera de la tubería ( $^{\circ}C$ )

A falta de datos más precisos se ha asumido una temperatura promedio en el alcantarillado de  $22^{\circ}C$  y una humedad del 95%. Estos valores suelen ser tomados como buenos promedios para calcular las tasas de corrosión en tuberías. Los resultados obtenidos son los siguientes:

**Zarandona**

Humedad relativa (%)	95
Temperatura ( $^{\circ}C$ )	22

	Sulfhídrico promedio (ppm)
Día 1	22,2779688
Día 2	18,8685063
Día 3	24,4165833
Día 4	30,6202938
Día 5	22,4076438
Día 6	22,0444271
Día 7	25,9292313

	Corrosión (mm/año)
Día 1	2,007714614
Día 2	1,847706323
Día 3	2,101873768
Día 4	2,35379622
Día 5	2,013549361
Día 6	1,997163373
Día 7	2,166002758
<b>Promedio</b>	<b>2,069686631</b>

PREDICCIÓN DE TASAS DE CORROSIÓN DEBIDAS A LA ACCIÓN DEL SULFURO DE HIDRÓGENO EN PUNTOS DE LA RED DE SANEAMIENTO DE LA REGIÓN DE MURCIA



**La Venta**

<b>Humedad relativa (%)</b>	95	<b>Sulfhídrico promedio (ppm)</b>	
<b>Temperatura (°C)</b>	22	<b>Día 1</b>	22,0427484
		<b>Día 2</b>	41,6722634
		<b>Día 3</b>	65,8518257
		<b>Día 4</b>	63,2063485

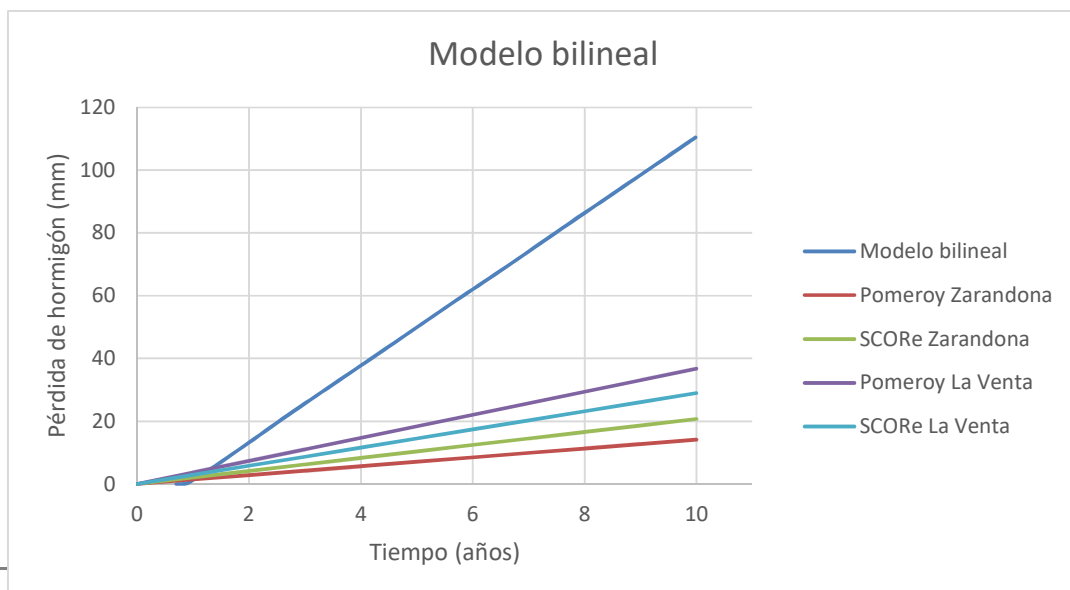
	<b>Corrosión (mm/año)</b>
<b>Día1</b>	1,997087329
<b>Día 2</b>	2,745919045
<b>Día 3</b>	3,451819632
<b>Día 4</b>	3,381773644
<b>Promedio</b>	2,894149913





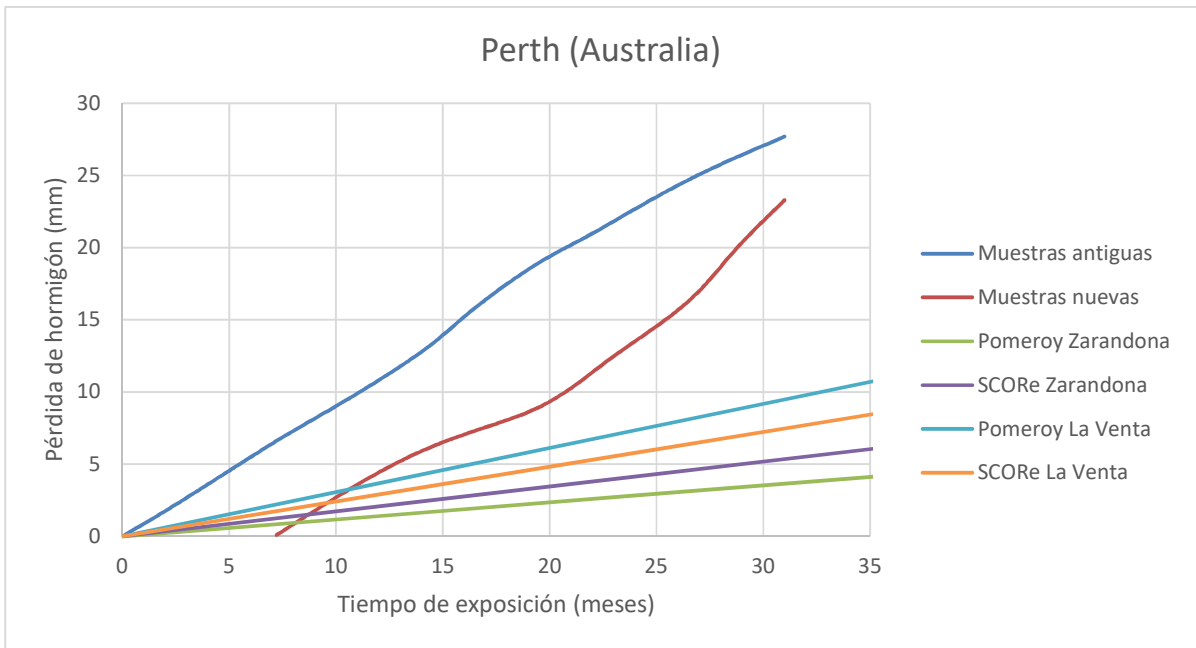
### 5. Conclusiones

Encontramos diferencias en los valores finales dependiendo de la ecuación que utilizamos para calcular la tasa de corrosión. Si comparamos los resultados obtenidos con la simplificación hecha por la Universidad de Newcastle (Australia) de un modelo bilineal para la pérdida de hormigón por corrosión, con unos valores despreciables en el período inicial y una pérdida a velocidad constante después de la iniciación, podemos observar como las pérdidas esperadas en los dos puntos de la red de alcantarillado de Murcia siguen una tendencia más lenta que las que predice este modelo.

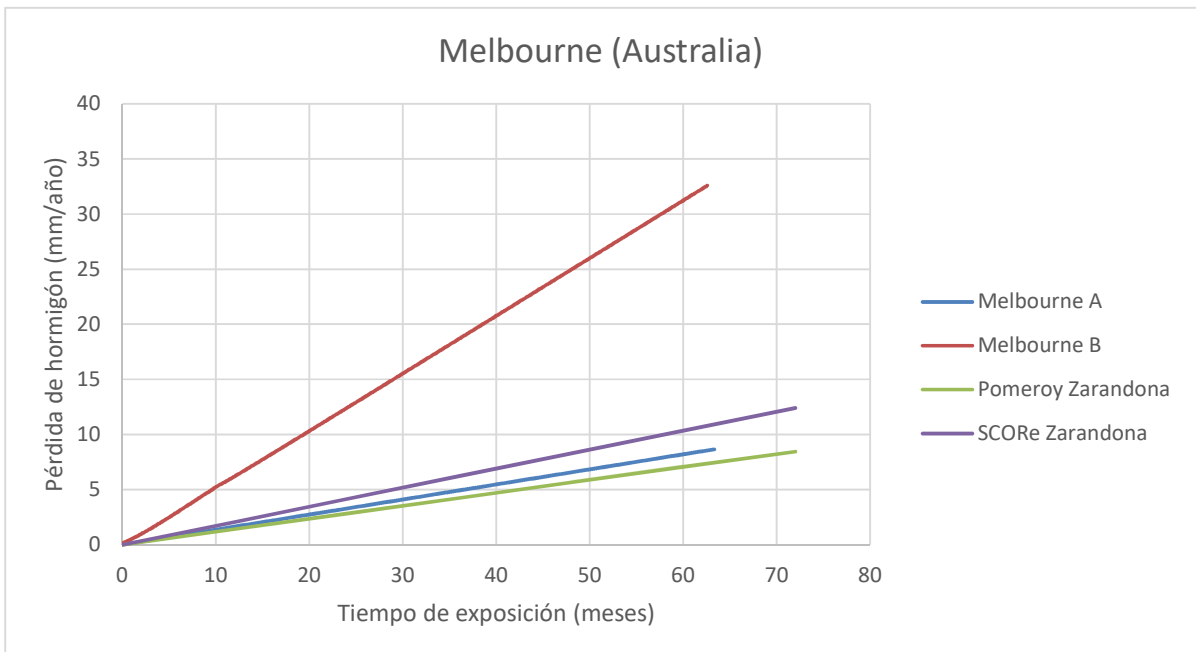


PREDICCIÓN DE TASAS DE CORROSIÓN DEBIDAS A LA ACCIÓN DEL SULFURO DE HIDRÓGENO EN PUNTOS DE LA RED DE SANEAMIENTO DE LA REGIÓN DE MURCIA

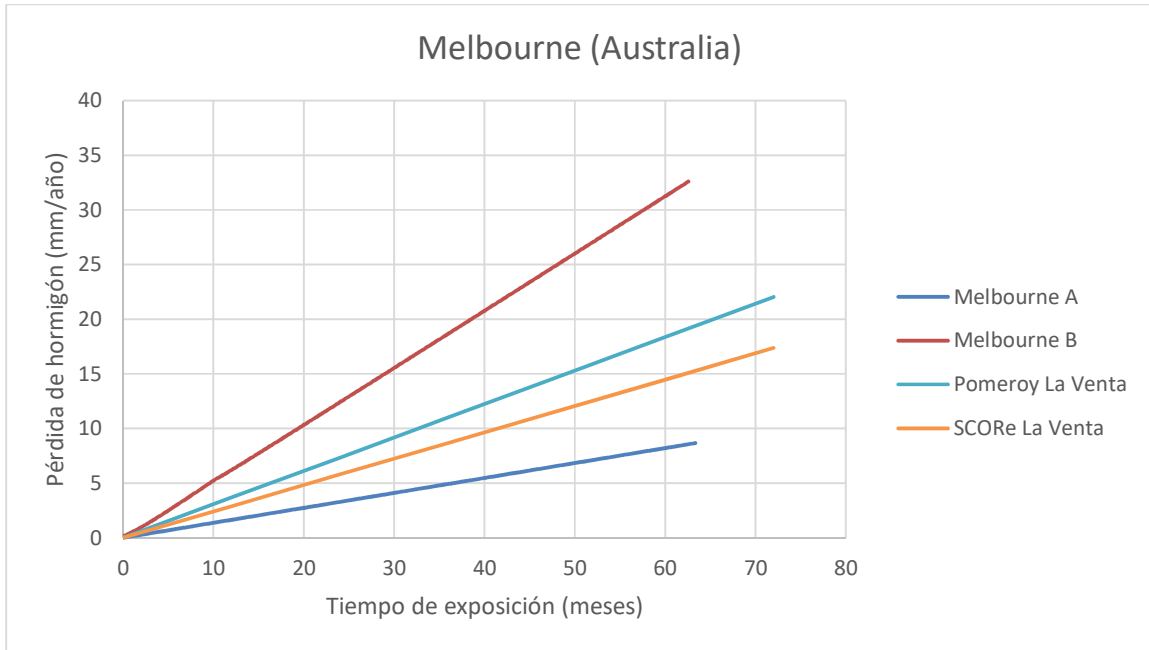
Podemos comparar también los resultados obtenidos con los estudios llevados a cabo en Melbourne y Perth vistos anteriormente, y que durante más de cinco años examinaron sistemas de alcantarillado con hormigones nuevos y de más de setenta años de antigüedad.



Tanto las muestras antiguas como las nuevas sufrían una corrosión más acelerada en Perth que la prevista en el alcantarillado de Murcia.



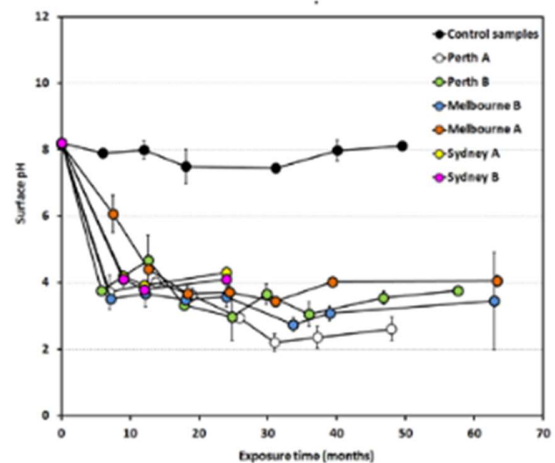
PREDICCIÓN DE TASAS DE CORROSIÓN DEBIDAS A LA ACCIÓN DEL SULFURO DE HIDRÓGENO EN PUNTOS DE LA RED DE SANEAMIENTO DE LA REGIÓN DE MURCIA



En estas gráficas sí que encontramos más semejanzas entre los resultados obtenidos en los puntos Melbourne A y Melbourne B de la red de alcantarillado de la ciudad australiana y las predicciones hechas para Zarandona y La Venta.

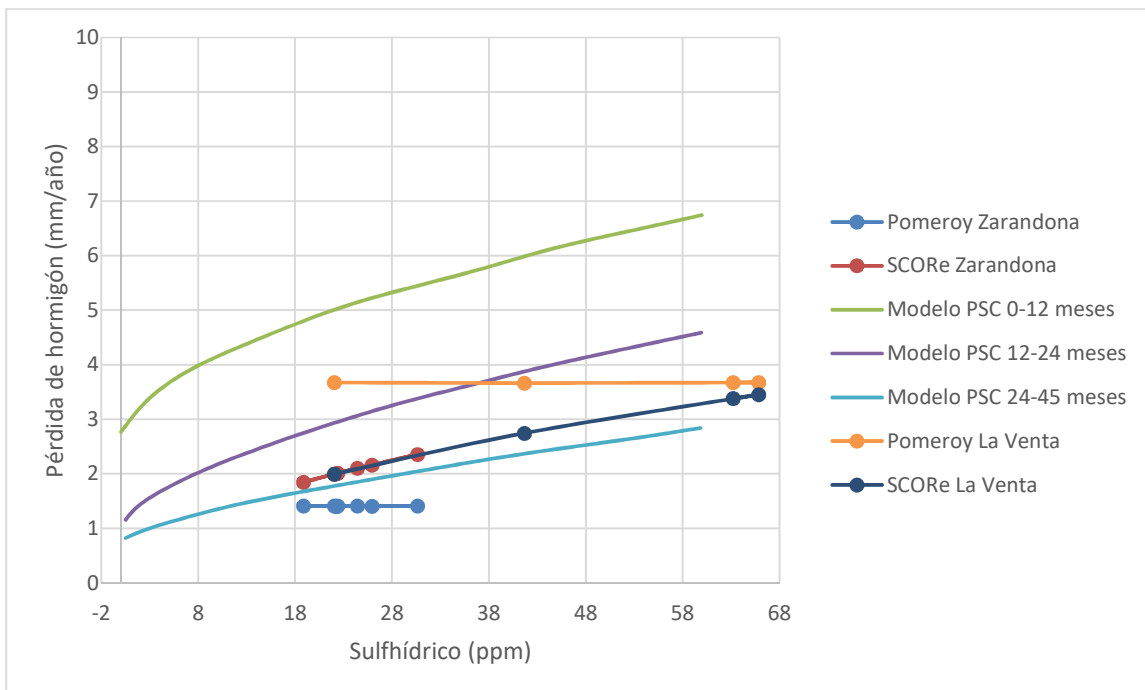
Las concentraciones medias de H<sub>2</sub>S en las localizaciones australianas oscilaron entre 400 ppm (Perth) y aproximadamente 1,5 ppm (Melbourne A), mientras que en Zarandona y La Venta, aunque los valores mínimos son similares los máximos no superan las 200 ppm. Las temperaturas medias de los gases de alcantarillado de Perth (26-27 ° C) también fueron más altas (unos 6 ° C) que las observadas en Melbourne. Esta puede ser una de las razones por las que los resultados de Melbourne se asemejan más a los de Zarandona y La Venta, ya que la temperatura que hemos supuesto en estos dos puntos (22°C) es similar a la registrada en Melbourne. La humedad media en las alcantarillas de Melbourne estuvo cerca de la saturación (RH > 97%) mientras que en Perth fue más seca (HR < 95%), parecida a la estimada en el caso de la red de saneamiento de Murcia (95%)

Si observamos la evolución del pH en la superficie de hormigón observamos que los valores en Perth y Melbourne son bastante más bajos que los supuestos en Zarandona y La Venta (pH=7).



Los valores superiores de corrosión en Australia podrían estar relacionados con unos niveles de pH más propensos para las bacterias precursoras de este proceso.

Por último podemos recurrir al estudio realizado por la Universidad de Queensland en Australia, que investigó desde el año 2010 los efectos de varios factores influyentes en el proceso de corrosión durante más de 3 años y medio, bajo condiciones controladas, simulando el ambiente propio de un alcantarillado. A partir de esas consideraciones propusieron dos modelos para estimar las tasas de corrosión (GPC y PSC), explicados más arriba. Veamos la relación Sulfhídrico-tasa de corrosión del modelo PSC y comparémoslo con los de Zarandona y La Venta:



Observamos cómo existe similitud con el modelo PSC en muestras tomadas a los 24-45 meses, lo que podría hacer pensar que los hormigones de la red de alcantarillado en Murcia han pasado ya su época de máximo desgaste debido a Sulfhídrico.

Como conclusión, las investigaciones llevadas a cabo por científicos e ingenieros como Pomeroy (1977) o los miembros de la SCORE han llevado al establecimiento de ecuaciones para predecir la corrosión de las alcantarillas y la longitud crítica del alcantarillado. Aunque la velocidad general de corrosión puede variar considerablemente, es posible predecir este proceso utilizando tanto las ecuaciones teóricas como las pruebas de laboratorio expuestas en este trabajo. Para una predicción exacta de la corrosión, los parámetros principales de la calidad del agua residual, la atmósfera de la tubería y las

especificaciones del hormigón deben estar disponibles, siendo la suposición de muchos de estos parámetros lo que sin duda nos ha dado resultados dispares en función del método de cálculo utilizado en cada caso.

## **6. Referencias bibliográficas**

GARCÍA, et al. Análisis de sensibilidad en la generación de sulfuros en redes de saneamiento. Caso de la ciudad de Murcia. Universidad Politécnica de Cartagena, 2017, 1-13.

SHARMA, Keshab Raj, et al. Dynamics and dynamic modelling of H<sub>2</sub>S production in sewer systems. *Water Research*, 2008, vol. 42, no 10, p. 2527-2538.

ROMANOVA, Anna, et al. Influence and interaction of temperature, H<sub>2</sub>S and pH on concrete sewer pipe corrosion. *International Journal of Civil, Architectural, Structural, Urban Science and Engineering*, 2014, vol. 8, no 6, p. 592-595.

POTTER, John C. Analysis of reinforced concrete-pipe performance data. *Journal of transportation engineering*, 1988, vol. 114, no 5, p. 530-538.

KURDZIEL, John M.; BEALEY, Mike. Discussion of "Analysis of Reinforced Concrete-Pipe Performance Data" by John C. Potter (September, 1988, Vol. 114, No. 5). *Journal of Transportation Engineering*, 1991, vol. 117, no 1, p. 136-137.

PARKER, CD t. Species of sulphur bacteria associated with the corrosion of concrete. *Nature*, 1947, vol. 159, no 4039, p. 439-440.

YUAN, Haifeng, et al. Degradation modelling of concrete submitted to sulfuric acid attack. *Cement and Concrete Research*, 2013, vol. 53, p. 267-277.

WELLS, T.; MELCHERS, R. E. An observation-based model for corrosion of concrete sewers under aggressive conditions. *Cement and Concrete Research*, 2014, vol. 61, p. 1-10.

JIANG, Guangming; KELLER, Jurg; BOND, Philip L. Determining the long-term effects of H<sub>2</sub>S concentration, relative humidity and air temperature on concrete sewer corrosion. *Water research*, 2014, vol. 65, p. 157-169.

PARKER, C. D. Mechanics of corrosion of concrete sewers by hydrogen sulfide. *Sewage and Industrial Wastes*, 1951, p. 1477-1485.

MANUAL, Design. Odor and corrosion control in sanitary sewerage systems and treatment plants. *Center for Environmental Research Information, US Environmental Protection Agency, Office of Research and Development: Washington, DC, USA*, 1985.

DIERCKS, M.; SAND, W.; BOCK, E. Microbial corrosion of concrete. *Cellular and Molecular Life Sciences*, 1991, vol. 47, no 6, p. 514-516.

SAND, Wolfgang; BOCK, Eberhard. Concrete corrosion in the Hamburg sewer system. *Environmental Technology*, 1984, vol. 5, no 12, p. 517-528.

WELLS, T.; MELCHERS, R. E. Modelling concrete deterioration in sewers using theory and field observations. *Cement and Concrete Research*, 2015, vol. 77, p. 82-96.

WELLS, Tony, et al. Factors involved in the long term corrosion of concrete sewers. *Australasian corrosion association proceedings of corrosion and prevention, Coff's Harbour, Australia*, 2009, vol. 11.

WELLS, Tony; MELCHERS, Robert. CONCRETE SEWER PIPE CORROSION—FINDINGS FROM AN AUSTRALIA FIELD STUDY.