



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

MÁSTER EN PRODUCCIÓN ANIMAL

Caracterización de un Sistema de Medida de CO₂ y Evaluación de su Aplicabilidad en Medidas de Ventilación y Bienestar Animal en Explotaciones Ganaderas

Trabajo Fin de Máster

Valencia, Julio 2013

Roberto Prieto Sancho

Director/es

Salvador Calvet Sanz

AGRADECIMIENTOS

No puedo dejar de incluir en este Trabajo Fin de Máster, mis agradecimientos más sinceros.

A mi familia y mi novia por todo el apoyo que desde el primer momento recibí de su parte.

Los compañeros, ahora mis amigos han sido muy importantes para hacer que este Máster no fuera tan solo una parte más de mi formación académica sino una experiencia de vida.

Por último, no menos importante, muchas gracias a todos los profesores que además de ser grandes profesionales son grandes personas, de los que he aprendido no solo conocimientos sino aptitudes durante este curso y en especial a mi tutor de tesina fin de máster, Salva por su inestimable ayuda.

Gracias a todos por hacerlo posible.

1. RESUMEN

En el interior de todas las naves ganaderas entre otros parámetros de control ambiental, se encuentra el dióxido de carbono (CO_2), que es producido por los animales y su estiércol. Este gas puede servir como estimador de la necesidad de ventilación y del bienestar animal. El objetivo de este estudio es evaluar una red de sensores inalámbrica (Wireless Sensor Network, WSN) con 12 sensores de CO_2 diseñada para estudiar los aspectos ambientales indicados anteriormente. Por consiguiente, se eligió dentro de un amplio rango de sensores en el mercado un sensor potencialmente adecuado en cuanto a su relación calidad/precio y que según las características del fabricante cumple con los requisitos exigidos para cumplir el objetivo planteado. El sensor utilizado es un medidor Infra-Rojo Lejano No Dispersivo (NDIR). Para conocer la respuesta del sensor, se realizaron diversas pruebas, en las cuales se compararon las concentraciones aportadas por el sensor con las obtenidas mediante un medidor de referencia. Los parámetros estudiados fueron en primer lugar la linealidad del sensor, en segundo lugar las posibles interferencias cruzadas por efecto de temperatura, humedad, nivel de carga de la batería y concentración de CH_4 (aprox. 100 ppm). En tercer lugar se estudió el tiempo de respuesta del sensor, definido en este estudio como el tiempo que tarda el sensor en alcanzar un 95% de cambio en las lecturas tras un cambio brusco de concentración. Finalmente, se analizó la repetibilidad entre los 12 sensores estudiados. Los resultados indican que el sensor es altamente lineal, aunque se detectaron interferencias cruzadas con el CH_4 y la temperatura ($p < 0,05$). El tiempo de respuesta del sensor se estimó en 5 minutos y 8 segundos. Los análisis de repetibilidad demuestran que, con la calibración de fábrica, hay diferencias significativas y muy relevantes entre los sensores, y también con el analizador de referencia. Puede concluirse que la red de sensores es adecuada para los usos arriba mencionados siempre que antes de cada periodo de utilización se realice una calibración del sensor similar a la realizada en este estudio. Sin embargo, el sensor no es adecuado para determinar concentraciones cambiantes de CO_2 como las que pueden darse en algunos alojamientos de ventilación natural.

ABSTRACT

Carbon dioxide (CO₂), which is produced by animals and their manure, is one of the environmental control parameters inside livestock buildings. This gas can be used as an estimator of the ventilation needs and is also related to animal welfare. The objective of this study is to evaluate a wireless sensor network (WSN) with 12 CO₂ sensors, designed to evaluate the environmental issues mentioned above. Therefore a sensor was chosen, among a wide range of commercial sensors, which is potentially suitable in terms of price and quality, and according to the characteristics of the manufacturer meets the requirements to achieve the objective of this study. The sensor used is a Non-Dispersive Infra-Red sensor (NDIR). To evaluate the sensor response, various tests were conducted in which concentrations provided by the sensors were compared with those obtained using a reference meter. The parameters studied were firstly sensor linearity; secondly, potential cross interferences of temperature, moisture level, battery charge and methane (CH₄) concentrations (about 100 ppm). Third, we studied the time response of the sensor, which is defined in this study as the time spent by the sensor to reach a 95% change in the readings after a drastic change of concentration. Finally, we examined the repeatability between the 12 sensors studied. The results indicate that the sensor is highly linear, but cross interferences were detected with CH₄ and the temperature ($p < 0.05$). The sensor response time was estimated at 5 minutes and 8 seconds. Repeatability analyses show that using the factory calibration there are very significant differences between the sensors, and also with the reference analyzer. It can be concluded that the sensor network may be suitable for applications referred to above, but before each period of use a sensor calibration similar to that performed in this study must be conducted. However, the sensor is not suitable for determining changing CO₂ concentrations as it may occur in some natural ventilation livestock houses.

RESUM

En l'interior de totes les naus ramaderes, entre altres paràmetres de control ambiental, es troba el diòxid de carboni (CO₂), que es produït pels animals i els seus femtes. Este gas pot servir com estimador de la necessitat de ventilació i també del benestar animal. L'objectiu d'este estudi és avaluar una xarxa sense fils de sensors (Wireless Sensor Network, WSN) amb 12 sensors de CO₂ dissenyada per a estudiar els aspectes ambientals indicats anteriorment. Per consegüent es trià, dins d'un ample rang de sensors en el mercat, un sensor potencialment adequat en quant a la seua relació qualitat/preu i que segons les característiques del fabricant compleix els requisits exigits per a assolir l'objectiu plantejat. El sensor utilitzat és un mesurador Infra-Roig Llunyà No Dispersiu (NDIR). Per a conèixer la resposta del sensor, es van dur a terme diverses proves, en les quals es compararen les concentracions aportades pel sensor amb les obtingudes mitjançant un mesurador de referència. Els paràmetres estudiats foren en primer lloc la linealitat del sensor, en segon lloc les possibles interferències creuades per efecte de temperatura, humitat, nivell de carrega de la bateria i concentració de metà (CH₄, aprox. 100 ppm). En tercer lloc s'estudià el temps de resposta del sensor, definit en este estudi com el temps que tarda el sensor en assolir un 95% de canvi en les lectures després d'un canvi abrupte de concentració. Finalment, s'analitzà la repetibilitat entre els 12 sensors estudiats. Els resultats indiquen que el sensor es altament lineal, encara que se detectaren interferències creuades amb el CH₄ i la temperatura (P<0,05). El temps de resposta del sensor s'estimà en 5 minuts i 8 segons. Les anàlisis de repetibilitat demostren que, amb el calibratge de fàbrica, hi ha diferències significatives i molt rellevants entre els sensors, i també amb l'analitzador de referència. Es pot concloure que la xarxa de sensors és adequada per als usos anteriorment mencionats sempre i quant abans de cada període d'utilització es duga a terme un calibratge dels sensors similar al realitzat en este estudi. No obstant això, el sensor no és adequat per a determinar concentracions canviants de CO₂ com les que poden donar-se en alguns allotjaments animals amb ventilació natural.

ÍNDICE GENERAL

1. INTRODUCCIÓN	1
1.1 Utilidad de medir CO ₂ en granjas	1
1.2 Metodologías para medida de CO ₂	2
1.3 Objetivos	4
2. METODOLOGÍA	5
2.1. Sensor utilizado	5
2.2. Red de sensores	5
2.3 Montaje experimental	6
2.4 Pruebas de caracterización del sensor	8
2.4.1 Prueba 1: Medición a 4 niveles de concentración	8
2.4.2 Prueba 2: Elevada concentración de CO ₂ durante varias horas	8
2.4.3 Prueba 3: Medición a 3 niveles de concentración	8
2.4.4 Prueba 4: Estudio del posible efecto cruzado del metano	9
2.4.5 Prueba 5: Frío/calor	9
2.4.6 Prueba 6: Aire húmedo/seco	9
2.4.7 Prueba 7: Nivel de batería del nodo sensor	10
2.4.8 Prueba 8: Estimación del tiempo de respuesta del sensor	10
2.4.9 Prueba 9: Comparación de los 12 sensores	10
2.5 Análisis de datos	10

3. RESULTADOS	12
3.1 Linealidad	12
3.2 Precisión del sensor	13
3.3 Posibles efectos cruzados	13
3.3.1 Efecto del CH ₄	13
3.3.2 Efecto temperaturas	14
3.3.3 Efecto humedad	15
3.3.4 Efecto batería	16
3.4 Tiempo de respuesta del sensor	17
3.5 Análisis de la red de sensores	17
3.5.1 Temperatura	19
3.5.2 Humedad Relativa (%)	19
4. DISCUSIÓN	21
5. CONCLUSIONES	23
6. BIBLIOGRAFÍA	24

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Imagen Sensor CO ₂ S-PPM	6
Figura 2: Esquema de la instalación diseñada para la calibración de los sensores de CO ₂	7
Figura 3: Resultados de distintos ensayos de linealidad en la medida de CO ₂ por el sensor utilizado	12
Figura 4: Efecto cruzado por el CH ₄	14
Figura 5: Efecto cruzado por la temperatura	15
Figura 6: Efecto cruzado por la humedad	16
Figura 7: Efecto cruzado por la batería	16
Figura 8: Tiempo de respuesta ante cambios bruscos de concentración	17

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Desviación estándar del sensor en concentraciones constantes bajas y altas	13
Tabla 2: Medidas de la lectura de CO ₂ , expresadas en ppm, proporcionados por la red de sensores y por el sensor de referencia	18
Tabla 3: Parámetros de calibración de los distintos sensores de CO ₂ analizados.	18
Tabla 4: Lecturas medias de temperatura (°C)	19
Tabla 5: Lecturas medias de Humedad Relativa (%)	20

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Utilidad de medir CO₂ en granjas

Año tras año, las exigencias medioambientales respecto a la emisión de gases efecto invernadero (GEI) son mayores y las normas de bienestar animal son modificadas, ampliadas y cada vez son más exigentes. Ello implica un mayor estudio en todos los sistemas influyentes en la calidad de vida de aquellos animales reproductores o productores que pasan su vida en una granja.

El dióxido de carbono (CO₂) es un gas muy relacionado con estos dos aspectos. Aunque su emisión en granjas no se considera una fuente neta de emisión de GEI (IPCC, 2006), se trata de un gas utilizado como trazador para cuantificar la ventilación en alojamientos ganaderos (CIGR, 2002), y a su vez es uno de los gases cuyos niveles están limitados para proteger el bienestar de los animales (Resano *et al.*, 2006).

Los balances de dióxido de carbono requieren medidas precisas de CO₂ para determinar los caudales de ventilación. Esta información es importante para una correcta climatización de las granjas, y también para posteriormente determinar las emisiones de contaminantes atmosféricos en alojamientos con ventilación natural. Éste es el caso de muchas de las explotaciones de rumiantes a nivel mundial, tanto de pequeños rumiantes como de vacuno, fundamentalmente destinado a la producción de leche. Paralelamente, se puede conseguir un mayor bienestar de los animales dentro de la granja y una mayor eficiencia en la ventilación.

Las emisiones de gases en las instalaciones ganaderas por lo general se estiman utilizando balances de masas de aire. La tasa de emisión se define como la diferencia entre el balance de flujos entre la entrada y salida de materia (Estelles *et al.*, 2011). Para cuantificar estas entradas y salidas de aire, se necesitan dos factores: las concentraciones de gases y las tasas de flujo de aire. La medición de gas, polvo y concentraciones de olor se puede lograr, con precisión aceptable, mediante el uso de una amplia variedad de técnicas (Chen *et al.*, 1999. Ni y Heber, 2008). Por el contrario, la medición de la tasa de flujo de aire en una granja es uno de los principales retos al estimar estas emisiones.

La tasa de flujo de aire se puede determinar usando varios métodos. De acuerdo con Philips *et al.* (2001) estos métodos se pueden clasificar en dos grupos principales con respecto a su naturaleza: métodos indirectos y métodos directos. Los primeros consisten en el uso de un gas trazador que permite la determinación del flujo de ventilación tanto en ventilación forzada como en ventilación natural. Los métodos de medición directa se basan en la determinación de los caudales de aire a través de todas las aberturas de la nave. Este segundo tipo de técnica es generalmente más preciso, pero solo se puede utilizar en granjas con ventilación forzada y se puede evaluar con todas las aberturas de la granja.

Al medir las emisiones atmosféricas en las granjas, las mediciones de flujos de aire por método directo son difíciles de aplicar en la práctica. Como se ha explicado antes, este método es muy difícil de aplicar en granjas con ventilación natural. Además, la

medición de ventilación en granjas con ventilación forzada, puede ser una tarea difícil y costosa (Pedersen *et al.*, 1998). Los métodos indirectos surgen entonces como una alternativa útil, que nos permite determinar las tasas de flujo de aire en la mayoría de las situaciones. El principio del método consiste en controlar las concentraciones de entrada y salida de un gas indicador con una tasa de liberación conocida. El flujo de aire se puede calcular mediante la aplicación de un balance de masas. Las características ideales de un gas trazador incluyen: concentraciones bajas y estables de fondo, sin riesgo de manipulación, facilidad de medición, la estabilidad en el tiempo y el bajo coste de uso (Phillips *et al.*, 2001). El dióxido de carbono, que se emite naturalmente en la granja cumple la mayor parte de estas características a excepción de bajos niveles de fondo (alrededor de 400 ppm en la atmósfera limpia). Sin embargo, la diferencia entre las concentraciones de CO₂ en el interior y fuera de la granja es normalmente elevada (salvo en alojamientos muy abiertos o muy ventilados), y se puede determinar con precisión con el equipo apropiado, que es un requisito adicional para trazadores (Van Quwerkerk y Pedersen, 1994). Por consiguiente, sensores de CO₂ se han utilizado comúnmente en Europa para determinar las tasas de ventilación en granjas (Pedersen *et al.*, 1998).

Adicionalmente, los ganaderos cada vez se les obligará a tener un mayor control de la ventilación dado que las normativas de bienestar animal exigen controlar la calidad del aire de los alojamientos. Así, en pollos de engorde el Real Decreto 692/2010, de 20 de mayo, en su Anexo 2, determina que la concentración de CO₂ no puede superar las 3.000 ppm medidas al nivel de las cabezas de los pollos. Sin embargo, en estos momentos no hay legislación vigente que obligue a no sobrepasar ciertos niveles de CO₂ en otras especies. Para estas se aconseja no sobrepasar las 5000 ppm a excepción de los conejos que no debe ser mayor a 3000 ppm (Resano *et al.* 2006). Una vez superado estos niveles se puede considerar que en el interior de la granja hay una deficiente ventilación.

1.2 Metodologías para medida de CO₂

En la actualidad hay diferentes tipos de sensores medidores de CO₂. Uno de los inconvenientes que explican su escasa utilización en ganadería es la relación entre su precio y sus prestaciones (precisión, resistencia a las condiciones de granja, etc.). Si se quiere obtener un sensor que sea preciso, el coste es muy elevado, mientras que si optamos por uno más económico, su falta de precisión conlleva a que su interés sea escaso en la utilización de este producto en explotaciones ganaderas.

A continuación se explican los distintos tipos de sensores de CO₂ más habituales:

- Espectroscopía infrarroja no dispersiva (Non-Dispersive Infra Red spectroscopy, NDIR). Este sistema de espectroscopía se compone principalmente de una fuente de infrarrojos (lámpara), una cámara para la muestra o tubo de luz, un filtro de longitud de onda y el detector de infrarrojos. El gas se difunde a la cámara de la muestra y la concentración de gas se mide electroópticamente por la absorción de una determinada longitud de onda en el infrarrojo (IR). La luz infrarroja se dirige cruzando la cámara de la muestra hacia el detector. El

detector tiene un filtro óptico frente a él, que elimina toda la luz, salvo la longitud de onda que pueden absorber las moléculas del gas seleccionado. Idealmente, las moléculas de otro tipo de gas no absorben la luz de esa longitud de onda y por tanto no afectan a la cantidad de luz que llega al detector. Sin embargo, en la práctica es habitual que existan interferencias cruzadas. Hay tres diferentes tipos de espectrometría infrarroja no-dispersiva; Absorción total, filtro negativo y filtro positivo (Crawley, 2008).

- Catalíticos: La tecnología catalítica ha sido aplicada tradicionalmente en la detección de gases combustibles aunque también se utiliza en la detección de gas CO₂. El sensor catalítico consiste en un pequeño elemento denominado “pellistor”, “perla” o “filamento catalítico” que está formado por un filamento de Platino calentado eléctricamente. Este filamento está recubierto primeramente con una base cerámica (aluminosa, por ejemplo) y posteriormente por una dispersión catalítica de Paladio o Rhodio en un sustrato de Torio (Selva X., 1999)
- Espectroscopía Infrarroja por Transformada de Fourier (Fourier-Transform Infra Red spectroscopy, FTIR). Consiste en la medición de la absorción de radiación infrarroja por parte de una muestra gaseosa, mediante un instrumento llamado interferómetro (Smith, 1996). Mediante la información del interferograma se aplica una manipulación matemática, la transformada de Fourier, que convierte el interferograma en un espectro de absorción de radiación en función de la longitud de onda.
- Espectroscopía Fotoacústica (Photo-Acoustic Spectroscopy, PAS). Este método consiste en la aplicación de luz infrarroja intermitente de determinadas longitudes de onda preseleccionadas en función de los gases a medir (Mcqueen, 1979). Cada tipo de molécula absorbe específicamente ciertas longitudes de onda y esa absorción se transforma en un incremento de temperatura del gas que conlleva un incremento de presión que es detectado acústicamente.

Lógicamente, dependiendo de cada tipo de método que se utilice, existe una variación en cuanto a precio y precisión. Por ejemplo en el caso de los métodos FTIR o PAS son muy precisos (1-2 ppm) pero también son muy caros (>30.000 euros); En el caso del método NDIR hay un amplio rango de valores económicos y de precisiones que oscilan entre el modelo Vaisala GMP343 con un precio mayor a 2000 euros y 3-5 ppm de error y Figaro TGS4161 por 36 euros y 200 ppm de error. Por tanto, es necesario considerar esta relación calidad precio a la hora de elegir un sensor que satisfaga las necesidades en granja, siendo una gama intermedia de sensores de tipo NDIR la más apropiada para este fin y evaluar su aplicabilidad de cara a los usos anteriormente descritos.

1.3 Objetivos

El objetivo de este estudio es evaluar la utilidad de un sistema de medición de CO₂ para estudios de ventilación y bienestar animal en explotaciones ganaderas. Más concretamente, se establecieron los siguientes objetivos:

- - Evaluar la aplicabilidad de una red de sensores inalámbrica para su uso en alojamientos ganaderos.
- - Caracterizar la respuesta de un sensor comercial de CO₂ en términos de sensibilidad, linealidad, repetibilidad y tiempo de respuesta.
- - A la vista de la respuesta del sensor, analizar su posible aplicación en explotaciones ganaderas.

2. METODOLOGÍA

2.1. Sensor utilizado

Previamente a este estudio se evaluaron los distintos sensores del mercado, con precisión suficiente y potencialmente aptos para ser utilizados en una red de sensores inalámbrica. Así, se establecieron como criterios de búsqueda que el sensor tuviera un bajo consumo eléctrico, una precisión igual o menor a 50 ppm, resistencia a condiciones de granja y que aporte información de otros parámetros físicos (temperatura y humedad relativa).

Después de una búsqueda de los sensores disponibles en el mercado, para la realización de este estudio, el sensor que se ha utilizado es el Sensor CO₂S-PPM, de rango de medición 0 – 10.000 ppm (SST Sensing Ltd., Reino Unido). Este es un sensor de gama intermedia en cuanto a precio-precisión se refiere, con lo cual disponemos de un sensor relativamente económico y en principio, suficientemente preciso, que por tanto es potencialmente interesante para medidas de CO₂ en explotaciones ganaderas.

El Sensor CO₂S-PPM utiliza un tipo de sensor NDIR y aplica un método simple de dispersión basado en la detección de CO₂ mediante radiación infrarroja generada por una lámpara LED (SST, 2010). Por lo tanto este sensor de CO₂ mediante este sistema consigue una medición bastante precisa consiguiendo tener un error aproximado de ± 50 ppm según especificaciones del fabricante. El rango de trabajo recomendado oscila entre temperaturas de 0 °C y 50 °C y humedad relativa (HR) de 0 a 95%, aunque puede trabajar en condiciones más desfavorables entre -25 °C y 55 °C.

El sensor CO₂S-PPM puede ser operado en tres modos diferentes (Modo Comando, Modo Transmisión y Modo Sondeo). En esta aplicación se utilizó el Modo Comando, que permite la extracción de gran información desde el sensor. El sensor CO₂S-PPM tiene la posibilidad de ser configurado para emitir hasta 5 campos de información (SST, 2011). Para esta aplicación se utilizaron los valores de concentración de CO₂, la temperatura y la humedad relativa.

2.2. Red de sensores

Los importantes avances que en los últimos años se han producido en el campo de la informática, electrónica y las comunicaciones, han hecho posible la aparición de nuevos paradigmas como las redes de sensores (Wireless Sensor Networks, WSN) las cuales, entre otras muchas, pueden encontrar en ésta un interesante campo de aplicación.

Hoy día nos encontramos ante un nuevo enfoque en lo que a sistemas de monitorización se refiere, ya que la irrupción de las WSN, aportando sistemas de medida autónomos, “inteligentes”, de pequeño coste/tamaño/consumo y con capacidad para obtener datos en su entorno y transportarlos hasta un centro de recogida donde serán almacenados para su posterior tratamiento, abre unas interesantes expectativas para abordar su

investigación como herramienta que permita estudiar la distribución espacial de la concentración de los gases que se deseen estudiar; en nuestro caso CO₂.

La WSN creada consistió en 12 nodos de sensores y un nodo receptor. A cada nodo de sensores se le dotó de un emisor de radio de baja potencia, de tal modo que el área de cobertura es relativamente pequeña, aunque suficiente para cubrir el área de un alojamiento ganadero comercial. De esta forma se consigue economizar de forma significativa el consumo de potencia. Adicionalmente, se establecieron mecanismos de encaminamiento con múltiples saltos, que permitan la comunicación con los nodos más alejados. También se aplicó la reutilización de frecuencias, que permite que dos nodos con áreas de cobertura disjuntas puedan emplear la misma banda de transmisión.



Figura 1: Imagen Sensor CO₂S-PPM.

2.3. Montaje experimental

La calibración de los sensores se ha realizado en una cámara de flujo controlado mediante la inyección de cantidades conocidas de CO₂, y comparando las lecturas del sensor de CO₂ a ensayar con un medidor de referencia.

Para la realización de este estudio ha sido necesaria la utilización de diferentes materiales (Figura 2). En primer lugar se utilizó una cámara de (30 x 30 x 50 cm) de metacrilato transparente donde se realizaron las pruebas a determinadas concentraciones de CO₂. La cámara se cerró mediante una tapa en la parte superior, sellada en sus extremos para evitar la salida del CO₂. En el interior de la cámara se ubicó un ventilador eléctrico para la homogenización del CO₂ en este espacio. Igualmente, se colocó el sensor CO₂S-PPM conectado al ordenador mediante el sistema inalámbrico antes mencionado y un registrador de temperatura y humedad (HOBO U12-013, OnsetComp, USA), que almacena los datos mediante una memoria interna.

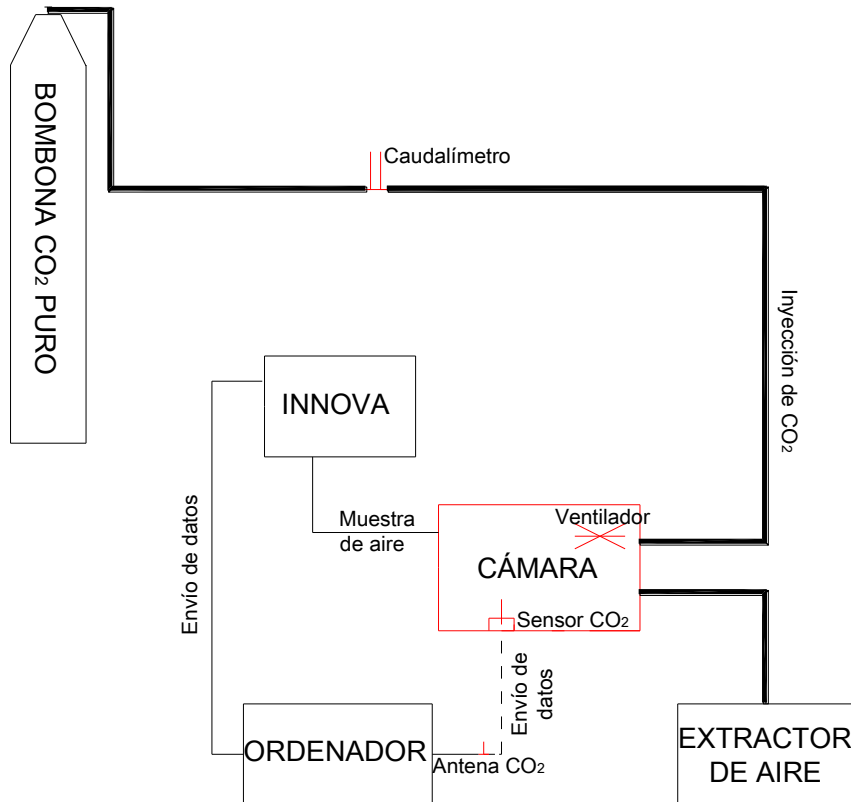


Figura 2: Esquema de la instalación diseñada para la calibración de los sensores de CO₂

En el exterior de la cámara se ubicó una bombona de CO₂ puro con la cual se crearon concentraciones prefijadas de CO₂ dentro de la cámara. Desde el manómetro de la bombona, se instaló un tubo de poliamida de 4 mm de diámetro interior hasta un caudalímetro para conocer en cada momento el caudal de CO₂ que entra en la cámara. De forma orientativa, haciendo pasar 1 L/min de CO₂ puro al interior de la cámara durante unos 90 segundos se conseguía una concentración en el interior de la misma de unas 5000 ppm.

La cámara se equipó también con un sistema de extracción de aire de la misma, mediante una bomba de aspiración con un caudal de 2,5 L/min. Esta extracción de aire permitía extraer el aire del interior de la cámara para reducir la concentración de CO₂.

Por último, se utilizó un analizador de gases fotoacústico (INNOVA 1412, LumaSense Technologies, Dinamarca) como analizador de referencia. Se trata de un sensor de mayor precisión (1,5 ppm CO₂), convenientemente calibrado, con el que se procedió a contrastar los resultados y en consecuencia poder realizar la calibración. Estudios previos con el sensor CO₂S-PPM indicaron que su rango de medida real oscilaba las 0-5000 ppm, y por tanto las pruebas realizadas se llevaron a cabo dentro de este rango. En todas las pruebas, el sensor CO₂S-PPM realizó mediciones cada 15 segundos, mientras que el medidor fotoacústico las realizó cada minuto aproximadamente. Ambos

medidores estuvieron sincronizados en el tiempo para posteriormente hacer la correspondencia entre las mediciones de uno y de otro.

2.4. Pruebas de caracterización del sensor

La caracterización del sensor CO₂S-PPM se realizó mediante las pruebas indicadas a continuación. En primer lugar, se realizaron algunas pruebas (de la prueba 1 a la 8) en un solo sensor, con el objetivo de caracterizar su funcionamiento general. Las pruebas se realizaron en este orden con el fin de ir identificando las distintas características del sensor. En las condiciones en las que se encuentran las explotaciones ganaderas, se dan factores que pueden afectar las lecturas de los sensores de CO₂. Se trata por ejemplo de cambios en la temperatura, la humedad relativa o concentraciones elevadas de CH₄. Posteriormente se realizó una prueba comparativa (Prueba 9) entre los distintos sensores.

2.4.1. Prueba 1: Medición a 4 niveles de concentración

Esta prueba se realizó con el objetivo de comprobar el comportamiento que muestra el sensor a distintas concentraciones de CO₂, aproximadamente 5000, 2500, 1000 y 500 ppm, y evaluar su linealidad. Para ello la cámara permaneció cerrada y con el ventilador en funcionamiento. Se introdujeron inicialmente aproximadamente 5000 ppm de CO₂ y se realizaron medidas durante aproximadamente 10 minutos. Una vez pasado este periodo, con la bomba de extracción se renovó el aire de la cámara, expulsando CO₂ hasta llegar aproximadamente a 2500 ppm. Se mantuvo esta concentración durante otros 10 minutos en los cuales se volvieron a realizar mediciones comparativas entre los dos sensores. Este proceso se repitió a concentraciones de 1000 ppm y 500 ppm.

2.4.2. Prueba 2: Elevada concentración de CO₂ durante varias horas

Durante toda una noche se dejó la cámara con una concentración de CO₂ alta, en torno a 5000 ppm. Esta prueba pretendió comprobar la estabilidad del sensor a elevada concentración de CO₂.

2.4.3. Prueba 3: Medición a 3 niveles de concentración

Se mantuvo a tres niveles de concentración diferentes (aprox. 5.00, 2500 y 500 ppm) de CO₂ durante 12 minutos cada una. Transcurridos los primeros 12 minutos, entre la primera y segunda concentración se extrae el CO₂ del interior de la cámara mediante el extractor. A la última concentración se llega con la apertura de la tapa de la cámara permitiendo el intercambio de aire.

2.4.4. Prueba 4: Estudio del posible efecto cruzado del metano

El metano (CH_4) es un gas que se encuentra habitualmente en explotaciones de rumiantes a concentraciones de hasta 100 ppm. Este gas, al igual que el CO_2 , que tiene capacidad de absorber radiación y por tanto puede ocasionar interferencias cruzadas con éste. Al añadir CH_4 en la cámara con el CO_2 comprobamos si este es un factor que influye en la medición del sensor distorsionando los datos.

- Se mantuvo durante una hora aproximadamente una concentración de partida próxima a 5000 ppm y se añadió CH_4 (gas de mezcla del 60% de CH_4 y 40% CO_2) hasta alcanzar unas 90 ppm. Se realizaron mediciones comparativas entre los dos sensores durante 1 hora. Una vez transcurrido este tiempo se extrajo paulatinamente aire del interior de la cámara mediante la bomba de aspiración, para conseguir distintas concentraciones de estos gases. Finalmente, se abrió la tapa entrando aire limpio.
- Con la tapa cerrada y sin incluir CO_2 puro, se inyectó 8 mL de CH_4 (60% CH_4 - 40% CO_2), alcanzando una concentración de unas 100 ppm que se mantuvo durante unos 15 minutos.

2.4.5. Prueba 5: Frío/calor

Mediante los cambios de temperatura, altas y bajas, se comprueba si este fenómeno físico influye en los datos obtenidos por el sensor.

Esta prueba se realizó en dos etapas, una incorporando frío a la cámara mediante placas de hielo, y una segunda calentando la cámara mediante una resistencia. Las mediciones comparativas entre ambos sensores se realizaron con aire limpio (de laboratorio) durante 10 minutos una vez estabilizados los niveles de temperatura de la cámara.

2.4.6. Prueba 6: Aire húmedo/seco

Con la aplicación de aire húmedo y seco se pretende conocer si se produce algún tipo de distorsión en los datos obtenidos por el sensor. Para humedecer o desecar el aire se hizo circular el aire por un frasco borboteador en el cual se introdujo agua (para humedecer el aire) o piedras de sílice (para desecarlo). Las mediciones comparativas entre ambos sensores se realizaron con aire limpio (de laboratorio) durante 10 minutos una vez estabilizados los niveles de humedad de aire.

2.4.7. Prueba 7: Nivel de batería del nodo sensor

Requiere una gran importancia conocer la respuesta del sensor en distintas condiciones de carga de la batería, ya que hay que saber en qué momento de carga las lecturas obtenidas por el sensor no son fiables.

La prueba consistió en mantener el sensor durante 10 minutos a una concentración de CO₂ próxima a 5000 ppm, posteriormente se permitió la entrada de aire limpio en la cámara descendiendo bruscamente la concentración aproximadamente a 500 ppm. Tras este cambio brusco de concentración el sensor tomó medidas hasta estabilizarse durante otros 10 minutos. Esta prueba se repitió con cada una de las diferentes cargas de batería (6,3; 5,7; 5,3 y 4,9 V).

2.4.8. Prueba 8: Estimación del tiempo de respuesta del sensor

Esta prueba consistió en mantener el sensor durante 30 minutos a una concentración de CO₂ próxima a 5000 ppm. Tras este período de tiempo se extrajo el sensor al exterior de la cámara, dejándolo expuesto al aire del laboratorio, con una concentración de aproximadamente 500 ppm. Tras este cambio brusco de concentración el sensor tomó medidas durante 30 minutos, estudiándose posteriormente el tiempo necesario para alcanzar un determinado porcentaje de cambio de concentración.

2.4.9. Prueba 9: Comparación de los 12 sensores

Una vez realizado las pruebas anteriores, se puso en prueba la utilidad de 12 sensores a la vez en la cámara para comprobar la repetibilidad de las lecturas obtenidas con distintos sensores. Para llevar a cabo esta prueba se decidió repetir lo indicado en la prueba 3, medición a tres niveles de concentración, pero aumentando a 30 min el tiempo transcurrido en cada nivel con el objetivo de conseguir una mayor estabilización de las lecturas, según los resultados de la prueba 8.

2.5. Análisis de los datos

La valoración de este estudio comenzó con la comprobación de la linealidad de las lecturas de CO₂ ofrecidas por el sensor modelo. Esto se realizó con datos de la Prueba 1. Para este fin se realizó un sencillo análisis de regresión (Excel 2007).

De la prueba 8 (estudio del tiempo de respuesta) se hicieron 9 repeticiones. Para cada repetición se aproximó el tiempo de respuesta del sensor a una curva estándar de caída de la concentración en un espacio cerrado y ventilado, de acuerdo con la ecuación:

$$C_t = C_{fin} + (C_{ini} - C_{fin})e^{-k*t}$$

Donde:

C_t = Concentración (ppm) en un tiempo dado (min)

C_{ini} = Concentración inicial (ppm)

C_{fin} = Concentración final (ppm)

k = Constante del modelo (min^{-1})

t = Tiempo transcurrido desde el cambio brusco de concentración (min)

Para obtener la constante del modelo, la ecuación anterior fue linealizada pasando todas las concentraciones a una parte de la ecuación y realizando posteriormente el logaritmo neperiano. Así, se ajustaron los datos a la siguiente ecuación de regresión lineal que pasa por el origen de coordenadas.

$$\text{Ln} \left(\frac{C_t - C_{fin}}{C_{ini} - C_{fin}} \right) = k \times t$$

Finalmente, una vez obtenido el valor de k , se obtuvieron los tiempos necesarios para obtener cambios de concentración del 90% y 95% tras el cambio brusco de concentración.

Tras realizar la prueba 9 (comparación de los 12 sensores), utilizó el programa informático estadístico Statgrhafics (Statgrhafics Centurion) para poder comparar los sensores entre ellos mediante un análisis de la varianza (Anova). La variable a estudiar fue la medida de CO_2 por cada sensor ($\text{CO}_2_{\text{sensor}}$), mientras que las variables independientes incluidas en el modelo fueron el número de sensor (S_i , $i=1-12$), nivel de concentración (C_j , $j= 500, 2500, 5000$ ppm) y su interacción. Adicionalmente, se introdujo la medida de CO_2 de referencia (CO_2_{ref}) como covariable, al detectarse pequeños cambios de concentración real durante cada prueba.

$$\text{CO}_2 \text{ Sensor} = \mu + S_i + C_j + S_i \times C_j + (\text{CO}_2_{\text{ref}}) + \varepsilon$$

Además para la prueba 9 (comparación de los 12 sensores) se realizó también un análisis de regresión para confirmar posibles diferencias en las rectas de calibración, según la siguiente ecuación:

$$\text{CO}_2 \text{ Sensor} = \beta_0 + \beta_1 \times \text{CO}_2_{\text{ref}} + \varepsilon$$

Donde β_0 y β_1 son los parámetros de regresión (ordenada en el origen y pendiente, respectivamente). Adicionalmente, para evaluar la existencia de diferencias significativas entre los parámetros de regresión de cada sensor, se realizó un análisis de regresión múltiple incluyendo todos los sensores mediante variables “dummy”.

$$\text{CO}_2 \text{ Sensor} = (\beta_0 + \beta_i) + (\beta_1 + \beta_j) \times \text{CO}_2_{\text{ref}} + \varepsilon$$

Donde β_i y β_j representan los efectos de cada sensor sobre los parámetros de regresión (ordenada en el origen y pendiente, respectivamente).

3. RESULTADOS

3.1. Linealidad

En la Figura 3 se presentan los resultados de linealidad del sensor obtenidos en la prueba 1 (excepto la gráfica superior). Se observa que la linealidad es alta a distintas concentraciones, aunque hay diversos datos descentrados que no se atribuye a que factores se debe. Los R^2 son próximos a 1, por lo que las lecturas del sensor CO₂S-PPM y del sensor de referencia marcan la misma tendencia.

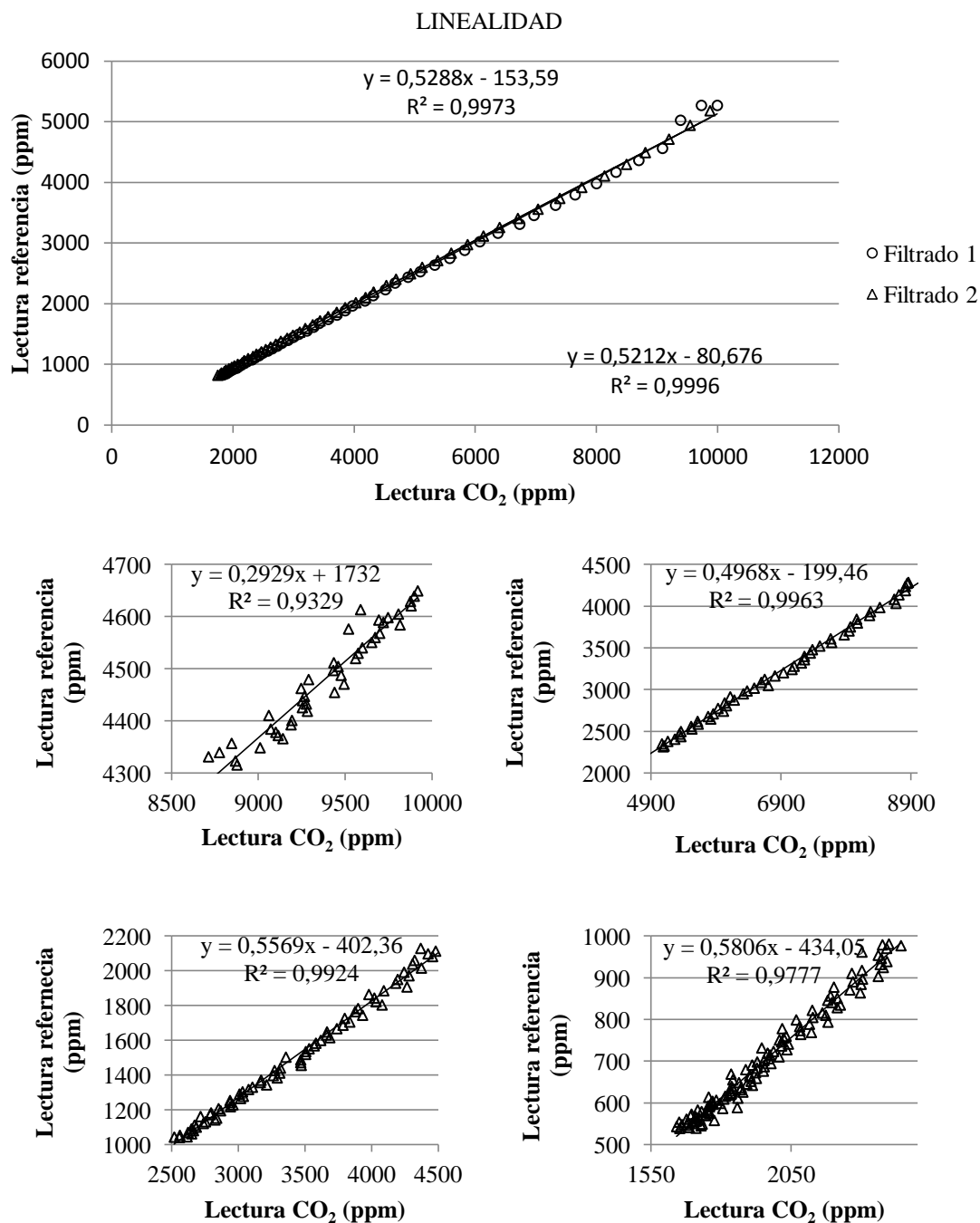


Figura 3: Resultados de distintos ensayos de linealidad en la medida de CO₂ por el sensor utilizado.

En la gráfica superior de la Figura 3 se muestra la linealidad existente entre dos sensores y el medidor de referencia en una prueba previa a este estudio. Dicha prueba previa se realizó antes de adquirir el resto de sensores, para evaluar el comportamiento del modelo seleccionado. En este gráfico se puede ver la homogeneidad entre ambos sensores y la alta linealidad con el medidor de referencia. El resto de gráficos de la Figura 2 pertenecen a los datos obtenidos en la prueba 1.

3.2. Precisión del sensor

De las pruebas 2 y 3 (concentraciones constantes) se obtuvieron datos de precisión del sensor a elevada y baja concentración respectivamente. Los valores obtenidos se indican en la Tabla 1. Para cada nivel medido se indica desviación estándar de las medidas obtenidas:

Tabla 1: Desviación estándar del sensor en concentraciones constantes bajas y altas.

Concentración de CO ₂ (ppm)	Desviación estándar sensor (ppm)
492	29
4282	45

Según los datos de la Tabla 1, a concentraciones constantes la desviación estándar en un principio está a un nivel inferior al ofrecido por el fabricante (± 50 ppm). También se observa que a concentraciones bajas la precisión es mayor que a concentraciones altas.

3.3. Posibles efectos cruzados

3.3.1. Efecto del CH₄

En la figura 4 se muestra el efecto cruzado que pueda tener el CH₄ sobre la lectura de CO₂. Se observa que las R² son muy parecidas y las pendientes tienden a ser paralelas mientras que ambas lecturas, con CH₄ y sin CH₄, mantienen un curso a distinto nivel puesto que hay una diferencia entre ellas de aproximadamente 500 ppm. Como se desconoce si estos datos son significativos o no por la aportación de CH₄ se realizó un estudio estadístico. También hay que añadir que ambas lecturas fueron realizadas en momentos diferentes en el tiempo, por lo que las diferencias encontradas podrían deberse no sólo al efecto del CH₄.

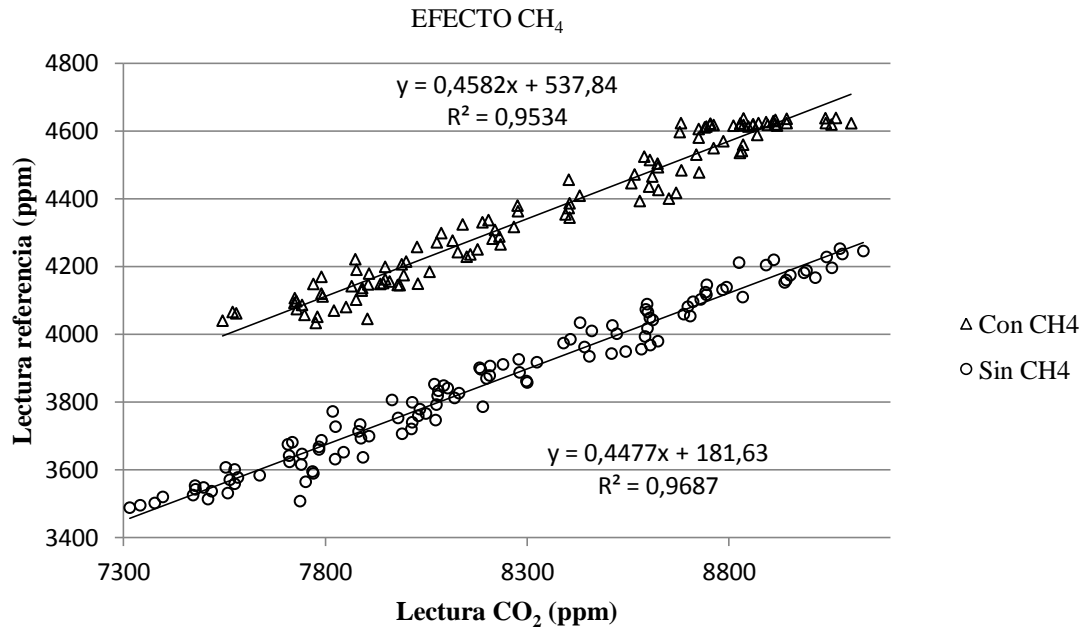


Figura 4: Efecto cruzado por el CH₄

Con los datos mostrados en la Figura 4 se realizó un análisis de regresión múltiple en el que a partir de este análisis se comprobó que la diferencia entre ambas lecturas son significativas como consecuencia de diferencias en la ordenada en el origen. Se puede concluir también que con los datos obtenidos las dos rectas obtenidas son paralelas porque no hay diferencias significativas entre sus pendientes. Así pues, estas diferencias podrían cuantificarse según la siguiente ecuación:

$$\text{Lectura Referencia} = 143,2 + 442,9 \cdot \text{CH}_4 + 0,45 \cdot \text{Lectura CO}_2$$

3.3.2. Efecto temperaturas

Otro factor físico que puede variar en granja, y que por tanto se debe observar si produce algún efecto cruzado es la temperatura. Como se puede ver en la Figura 5 las lecturas obtenidas en la prueba 5 se encuentran distribuidas horizontalmente de manera diferente y manteniendo un amplio rango de error. Esto origina confusión a la hora de poder demostrar si realmente afecta o no la temperatura a las lecturas ofrecidas por el sensor estudiado.

Por este motivo se realiza un estudio más amplio con statgraphics para saber si existen diferencias significativas o no a la hora de aportar temperaturas altas o bajas. En este caso mediante un análisis de la varianza se demuestra que efectivamente la temperatura produce efecto cruzado respecto con la lectura del sensor ($p < 0,05$).

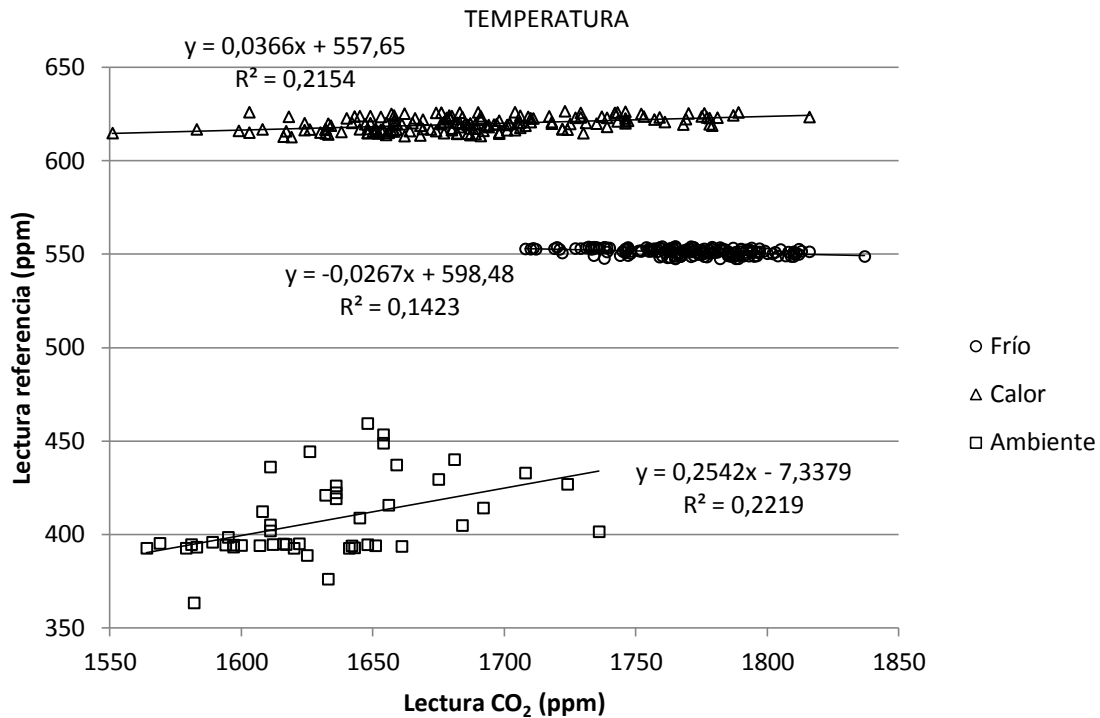


Figura 5: Efecto cruzado por la temperatura

3.3.3. Efecto humedad

Todas las explotaciones ganaderas están siempre expuestas a líquidos, ya sea orina, agua de los bebederos, agua de limpieza, exudación de los animales, etc. contribuyendo todo esto a un exceso de humedad. Se puede observar como en la Figura 6 los datos se distribuyen de manera parecida a excepción de las temperaturas altas ya que se puede ver que aumenta el error entre los datos más opuestos. Con las lecturas relativas del sensor tenemos una desviación estándar muy pequeña aunque se desconoce el motivo por el cual las pendientes son opuestas. En principio no se puede decir que la humedad no afecta a la lectura del sensor. Por lo tanto se debe realizar un estudio más determinante.

Como en el caso anterior se decide hacer un análisis de la varianza el cual nos confirma que la humedad no tiene efecto significativo respecto a las medidas realizadas por el sensor ($p > 0,05$).

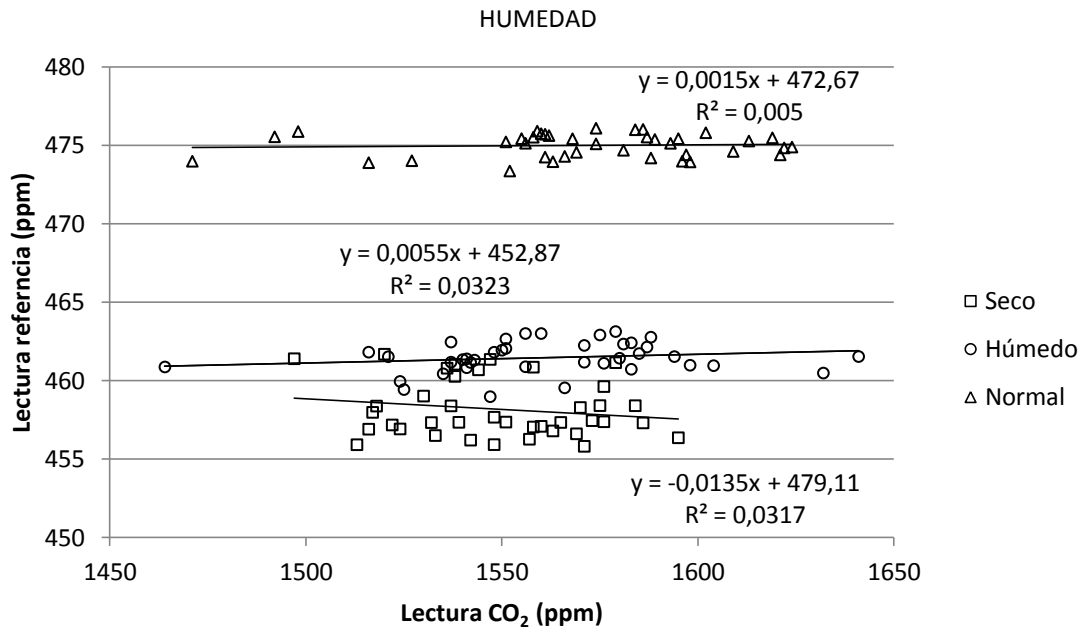


Figura 6: Efecto cruzado por la humedad

3.3.4. Efecto batería

A disposición de las diferentes cargas de batería se puede ver en la Figura 7 como existe una amplia linealidad de las lecturas obtenidas. Hay una variación de concentración en cada prueba debido a que cada una se realizó en distintos momentos en el tiempo. Según se muestran los resultados es viable decir que hasta un nivel de batería superior o igual a 4.9 V no hay distorsión en los datos estudiados.

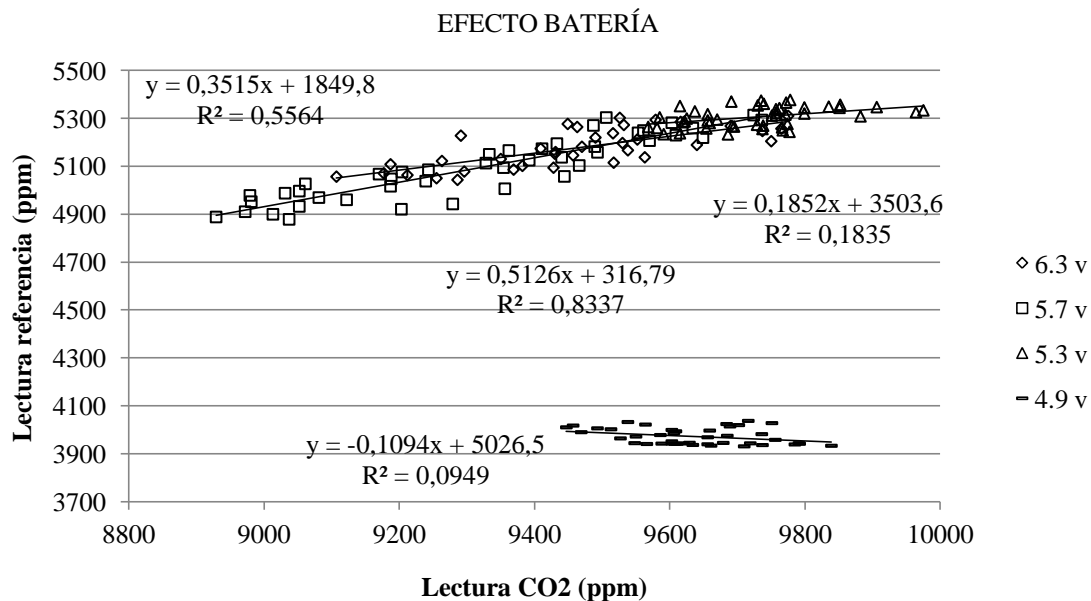


Figura 7: Efecto cruzado por estado de la batería

3.4. Tiempo de respuesta del sensor

En la Figura 8 se expone la curva formada por la caída brusca de concentración de CO₂ (prueba 8). Esta figura representa en tanto por ciento la caída de concentración y el tiempo transcurrido. Con esta curva podemos obtener el tiempo que tarda el sensor en alcanzar un cambio del 90 o 95 % de la diferencia de concentraciones.

Según la fórmula de cambio de concentración en espacio cerrado y ventilado, se obtuvo una constante de caída de concentración de 0,582 min⁻¹, de forma que para alcanzar el 90 % de caída de concentración tiene que transcurrir un periodo de 3 minutos y 57 segundos, mientras que para llegar a un 95 % el tiempo fue de 5 minutos y 8 segundos. La forma de las curvas de caída de concentración, y el tiempo que tarda en estabilizarse al 90 y 95 % en esta prueba, denotan que el comportamiento del sensor ante cambios bruscos de concentración es bastante repetible.

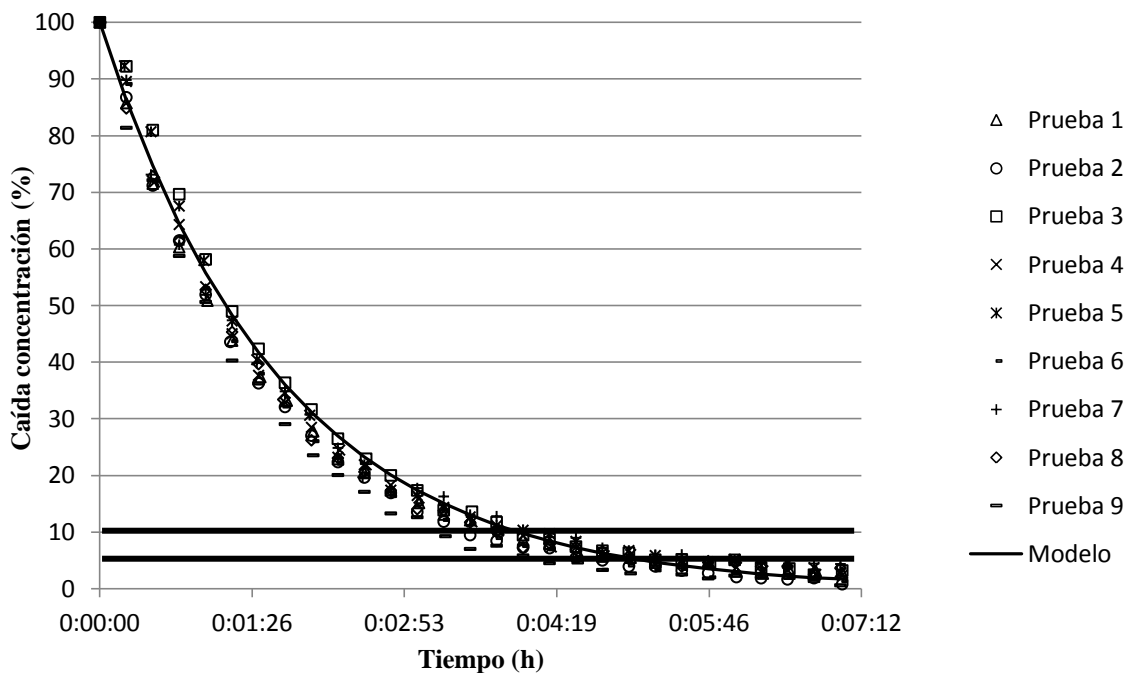


Figura 8: Tiempo de respuesta ante cambios bruscos de concentración

3.5. Análisis de la red de sensores

Puesta en práctica la utilización de una red de sensores, se pueden ver en la Tabla 2 los valores medios de CO₂ obtenidos por cada sensor y en cada nivel de concentración de CO₂. Se observa que existieron diferencias significativas entre las lecturas de los diferentes sensores utilizados en los distintos niveles de concentración ensayados ($p < 0,05$). En la Tabla 2, además se observa que en todos los casos, las lecturas de los sensores ensayados fueron muy superiores a los niveles indicados por el medidor de referencia (Innova).

Tabla 2: Medias de la lectura de CO₂, expresadas en ppm, proporcionados por la red de sensores y por el sensor de referencia.

Id Sensor	Nivel		
	500 ± se	2500 ± se	5000 ± se
1	2328,0 ^l ±2,1	5823,5 ^l ±4,0	9153,7 ^k ±6,9
2	841,6 ^c ±2,1	3013,3 ^f ±4,0	5073,8 ^d ±6,3
3	774,1 ^b ±2,1	2843,2 ^b ±4,0	4885,5 ^b ±6,3
4	1976,8 ^k ±2,1	5133,0 ^k ±4,0	8280,0 ^j ±6,3
5	943,2 ^g ±2,1	3150,3 ^g ±4,0	5339,7 ^g ±6,3
6	743,1 ^a ±2,1	2751,7 ^a ±4,0	4762,0 ^a ±6,3
7	866,6 ^t ±2,1	2992,8 ^e ±4,0	5111,2 ^e ±6,3
8	828,0 ^d ±2,1	2951,6 ^d ±4,0	5079,9 ^d ±6,3
9	978,7 ^h ±2,1	3164,2 ^h ±4,0	5274,7 ^t ±6,3
10	1219,9 ⁱ ±2,1	3547,7 ⁱ ±4,0	5759,0 ^h ±6,3
11	1333,6 ^l ±2,1	3779,1 ^l ±4,0	6132,3 ⁱ ±6,3
12	822,0 ^c ±2,1	2921,5 ^c ±4,0	4993,7 ^c ±6,3
INNOVA	607,9 ±2,6	2386,5 ±2,6	4039,4 ±2,6

Adicionalmente, se obtuvo un efecto significativo de la interacción entre el sensor utilizado y el nivel de CO₂ ensayado. Esto indica la posibilidad de que las pendientes de las rectas de calibración de cada sensor sean distintas. Esto indica, por ejemplo, que a niveles bajos de concentración de CO₂ la lectura de un sensor “A” sea mayor que la de otro sensor “B”, pero que a niveles altos de concentración de CO₂ suceda lo contrario.

La Tabla 3 muestra los coeficientes de regresión de la recta de calibración donde se confirmaron diferencias significativas ($p < 0,05$) en las rectas de calibración, tal como sugieren los resultados indicados anteriormente.

Tabla 3: Parámetros de calibración de los distintos sensores de CO₂ analizados. El modelo de calibración es: $CO_2 \text{ sensor} = \beta_0 + \beta_1 \times CO_2 \text{ ref} + \varepsilon$

Id Sensor	β_0	β_1	R ²	Error estándar de estimación
1	1086 ^a	2,00 ^a	0,998	116,3
2	83 ^b	1,23 ^b	0,997	92,4
3	20 ^c	1,20 ^c	0,996	110,1
4	821 ^d	1,83 ^d	0,997	147,7
5	132 ^e	1,28 ^e	0,994	140,4
6	3 ^c	1,17 ^f	0,996	106,9
7	82 ^b	1,24 ^{bg}	0,996	108,7
8	41 ^t	1,24 ^g	0,997	103,6
9	198 ^g	1,25 ^h	0,995	128,6
10	398 ^h	1,33 ⁱ	0,994	147,1
11	459 ⁱ	1,40 ^j	0,993	164,8
12	56 ^f	1,21 ^k	0,996	105,7

A pesar de las diferencias entre las rectas de calibración, la R^2 de cada sensor está muy próxima a 1 mostrando la repetibilidad de los datos. Sin embargo, el error estimado es alto en todos los sensores.

Como estudio aparte, mediante un análisis de la varianza (Anova), se observaron los datos recibidos por los sensores de temperatura y humedad.

3.5.1. Temperatura

Las temperaturas medias obtenidas por cada sensor y nivel se registran en la tabla 4. En este caso la mayoría de los sensores mantienen una medida muy similar siendo una minoría los que mantienen diferencias significativas con un valor de confianza superior al 95%. Los sensores que en este caso tienen diferencias significativas con respecto a los demás, esta diferencia es mínima, aproximadamente $0,30^{\circ}\text{C}$, por lo tanto pueden considerarse diferencias significativas no relevantes.

Tabla 4: Lecturas medias de temperatura ($^{\circ}\text{C}$).

Id Sensor	Nivel		
	500 \pm se	2500 \pm se	5000 \pm se
1	23,91 ^{ab} \pm 0,50	23,95 ^b \pm 0,53	23,92 ^c \pm 0,49
2	24,02 ^d \pm 0,37	24,10 ^f \pm 0,34	24,00 ^d \pm 0,35
3	23,89 ^a \pm 0,27	23,91 ^a \pm 0,20	23,80 ^a \pm 0,27
4	24,02 ^d \pm 0,29	24,12 ^{fg} \pm 0,25	23,92 ^c \pm 0,20
5	23,93 ^b \pm 0,21	24,01 ^c \pm 0,15	23,87 ^b \pm 0,28
6	23,95 ^c \pm 0,22	24,03 ^d \pm 0,15	23,91 ^c \pm 0,27
7	24,18 ^h \pm 0,29	24,26 ⁱ \pm 0,20	24,11 ^g \pm 0,15
8	24,10 ^f \pm 0,24	24,14 ^g \pm 0,10	24,04 ^e \pm 0,20
9	24,13 ^g \pm 0,25	24,23 ^h \pm 0,16	24,03 ^e \pm 0,16
10	24,05 ^e \pm 0,27	24,13 ^{fg} \pm 0,29	23,92 ^c \pm 0,26
11	24,20 ^h \pm 0,31	24,30 ^j \pm 0,25	24,08 ^f \pm 0,20
12	24,03 ^{de} \pm 0,20	24,06 ^e \pm 0,11	23,90 ^c \pm 0,23

3.5.2. Humedad Relativa (%)

Los datos de Humedad ofrecidos en la Tabla 5 demuestran que todos los sensores marcan unas lecturas homogéneas y que las diferencias significativas son del orden del 1%, que pueden considerarse no relevantes dentro del ámbito de estudio en que estos sensores serán aplicados.

Tabla 5: Lecturas medias de Humedad Relativa (%).

Id Sensor	Nivel		
	500 +- se	2500 +- se	5000 +- se
1	51,2 ^d ± 2,6	51,3 ^g ± 2,2	50,4 ^{cd} ± 3,0
2	50,5 ^b ± 3,1	50,7 ^{cd} ± 2,6	50,8 ^{efg} ± 3,2
3	50,9 ^c ± 2,9	51,1 ^{ef} ± 2,6	50,7 ^e ± 3,3
4	50,9 ^c ± 3,1	51,2 ^{ef} ± 2,6	50,9 ^{fg} ± 3,2
5	50,9 ^c ± 3,0	51,1 ^e ± 2,7	50,8 ^{ef} ± 3,3
6	50,8 ^c ± 3,1	51,2 ^{fg} ± 2,7	51,0 ^g ± 3,3
7	50,0 ^a ± 2,9	50,4 ^b ± 2,2	50,2 ^b ± 3,0
8	50,5 ^b ± 2,7	50,7 ^{cd} ± 2,4	50,3 ^{bc} ± 3,2
9	50,5 ^b ± 3,0	50,8 ^d ± 2,3	50,5 ^d ± 2,9
10	49,9 ^a ± 3,3	50,2 ^a ± 3,0	49,8 ^a ± 3,6
11	49,9 ^a ± 2,6	50,1 ^a ± 2,2	49,9 ^a ± 2,9
12	50,4 ^b ± 2,8	50,6 ^c ± 2,4	50,2 ^b ± 3,1

4. DISCUSIÓN

La utilización de WSN ha sido identificada como una de las tecnologías más prometedoras por diversos analistas tecnológicos y revistas especializadas, entre las que pueden citarse el observatorio tecnológico del MIT (MIT, 2003). Por lo tanto el uso de redes de sensores inalámbrica en producción ganadera adquiere un gran interés entre otras cosas, por ejemplo, como herramienta útil para conocer frecuentemente el estado físico de los animales (Kwong K.H., et al., 2009. Wu T.T., et al., 2009) o para que mediante un teléfono móvil se controle una explotación ganadera (cámaras de vídeo, temperatura, humedad, gases, etc.) en tiempo real, entre otras funciones (Hwang J., et al., 2012).

De forma más concreta, la utilización de una red inalámbrica de sensores de CO₂ adquiere un gran interés en el presente y en el futuro inmediato en las granjas Europeas por las exigencias, cada vez más exigentes, de bienestar animal. Para poder conseguir la incorporación de esta herramienta tecnológica en el campo de la ganadería es necesario que su precisión sea alta y su coste sea económico. En este sentido, este trabajo aborda el estudio de un sensor potencialmente útil para este objetivo.

Tras una serie de pruebas en un ambiente controlado, los resultados obtenidos por el sensor CO₂S-PPM, muestran que se consigue una linealidad muy buena ya que las R² son próximas a 1, aunque los parámetros físicos estudiados como el CH₄ y la temperatura afectaron de manera significativa a las lecturas. Esto puede deberse al tipo de sensor utilizado (NDIR) ya que la inclusión de otros parámetros físicos que están presentes en cantidades variables en la atmósfera de las granjas pueden producir una interferencia en la lectura de CO₂. Sin embargo la humedad relativa, que es otro parámetro físico que se encuentra en todas las granjas a niveles elevados, no pareció afectar a la lectura del sensor.

En el caso de pruebas en las cuales se ha producido un descenso progresivo y prolongado de la concentración de CO₂ dentro de la cámara, la linealidad que ha mostrado el sensor CO₂S-PPM ha sido alta con lo cual el comportamiento de este se ha correspondido bien con el sensor de referencia, (INNOVA). Sin embargo, la calibración de fábrica es insuficiente, siendo necesaria una calibración *in situ*.

Es destacable el tiempo de respuesta del sensor. Cuando se producen cambios bruscos de concentración, el sensor tarda aproximadamente 5 minutos en conseguir la estabilidad (95% del cambio de concentración). Es un tiempo de respuesta aceptable para numerosas aplicaciones prácticas (p.ej. bienestar animal, medida de concentraciones de salida de muchos alojamientos), pero limita su utilización en ciertos campos, por ejemplo determinar la concentración de CO₂ de salida en alojamientos de ventilación natural, en los que las salidas de aire se pueden convertir en entradas o lugares donde se producen corrientes de aire limpio alterando bruscamente la concentración de CO₂.

Una de las características negativas más destacables que se han encontrado en este modelo de sensor ha sido que al utilizar la red de sensores, ningún sensor fue igual que los demás según su calibración de fábrica. Los 12 sensores han mantenido diferencias significativas entre ellos ($p < 0,05$), algunos con diferencias muy relevantes. Por otro lado ningún sensor se aproximó a la lectura ofrecida por el sensor de referencia (INNOVA), marcando todos valores superiores.

En el resto de pruebas, el sensor modelo demostró tener regularidad en todos los datos obtenidos a lo largo de este estudio, lo que implica que, con la calibración correspondiente, el sensor utilizado es adecuado para su utilización en el campo ganadero así como en otros ambientes.

La utilización de una red de sensores en granja es una herramienta muy útil para saber cuándo el ambiente interior supera los límites establecidos de CO_2 , además de poder determinar en tiempo real la necesidad de ventilación de acuerdo con este criterio. Con una amplia red de sensores se puede controlar la ventilación y el bienestar animal al reducir los GEI, y parámetros físicos como la humedad, temperatura, polvo, etc.

Un campo en que mayor interés puede tener un sensor de CO_2 en el ámbito ganadero, es en granjas avícolas ya que en este caso la legislación obliga a tener una concentración de CO_2 inferior a 5000 ppm. También, por las características del sensor $\text{CO}_2\text{S-PPM}$, es utilizable en cualquier tipo de granja a excepción de granjas abiertas. Aunque, este sistema de medición es más aplicable en granjas de ventilación natural ya que en estas no se suele utilizar ningún dispositivo que nos aporte información sobre la cantidad de parámetros físicos y son granjas propicias a un deficiente control de la ventilación.

Una vez finalizado el estudio del sensor $\text{CO}_2\text{S-PPM}$ se puede decir que tras las pruebas realizadas las carencias del sensor son la implicación de parámetros físicos como el CH_4 y la temperatura en las lecturas; el tiempo en la estabilización del sensor tras cambios bruscos de concentración y el desajuste de lecturas entre la red de sensores.

Para contrastar estas carencias, es necesario calibrar el sensor a dos puntos (p.ej. 500 y 5000 ppm), antes de cada campaña de mediciones, y que en el lugar de trabajo en granja no esté expuesto a frecuentes corrientes de aire.

Hoy en día las mejoras en nuevas tecnologías están a la orden del día. Con los nuevos avances seguramente en un futuro cercano estarán disponibles en el mercado nuevos sensores de CO_2 económicos y con mejores prestaciones. Hasta entonces, este sistema de red inalámbrica sirve de gran utilidad para el control de CO_2 en granjas de cualquier dimensión.

5. CONCLUSIONES

A partir de los resultados de este estudio pueden extraerse las siguientes conclusiones:

- La respuesta del sensor a concentraciones de CO₂ entre 500 y 5000 ppm es altamente lineal.
- Se detectaron interferencias cruzadas con la temperatura y con elevadas concentraciones de CH₄ (aproximadamente 100 ppm).
- Para una caída de concentración del 95% se estimó un tiempo de respuesta de 5 minutos y 8 segundos.
- Con la calibración de fábrica, la repetibilidad fue muy baja entre los 12 sensores estudiados, en ningún caso fueron homogéneos ($p < 0,05$). Esta baja repetibilidad implica la necesidad de calibrar los sensores antes de cada periodo de trabajo.
- Uso en ganadería adecuado siempre que se calibre y considerando el tiempo de respuesta del sensor.

6. BIBLIOGRAFÍA

- CHEN Y., BARBER E.M., ZHANG Y., BESANT R.W., SOKHANSANJ S., 1999. Methods to measure dust production and deposition rates in building. *J Agr Eng Res* 72(4), 329-340.
- CIGR, PEDERSEN S., SÄLLVIK K., 2002. Heat and moisture production at animal and house levels. 4th report of working group on climatization of animal houses. 5-41.
- CRAWLEY L.H., 2008. Application of non-dispersive infrared (NDIR) spectroscopy to the measurement of atmospheric trace gases. Master of Science in Environmental Science. University of Canterbury, 99 pág.
- ESTELLES F., FERNANDEZ N., TORRES A. G., CALVET S., 2011. Use of CO₂ balances to determine ventilation rates in a fattening rabbit house. *Span J Agric res* 9 (3), 713-720.
- HWANG J., YO E H. 2012. Study on the smart application for wireless sensor networks based ubiquitous livestock farm system. Proceedings of the 2012 World Congress in Computer Science, Computer Engineering and Applied Computing. Las Vegas, USA.
- IPCC, 2006. IPCC emissions from livestock and manure management. En "Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Volume 4: Agriculture, Forestry and Other Land Use". Intergovernmental Panel on Climate Change and Other Land Use.
- KWONG K.H., WU T.T., GOH H.G., STEPHEN B., GILROY M., MICHIE C., ANDONOVIC I. 2009. Wireless sensor networks in agriculture: cattle monitoring for farming industries. Centre for intelligent dynamic communications, Department of Electronic and Electrical Engineering University of Strathclyde, Glasgow, United Kingdom. *PIERS online*, Vol. 5, No. 1. pp 31-35.
- MCQUEEN, D.H., 1979. Acoustical theory of photoacoustic effect in gaseous and liquid-media. *Journal of physics d-applied physics* 12(10), 1673-1678.
- MIT 2003. 10 Emerging Technologies That Will Change the World. *Tecnology Review "MIT"*, 2003.
- NI J.Q., HEBER A. J., 2008. Sampling and measurement of ammonia at animal facilities. *Adv Agron* 98, 201-269.
- PEDENSEN S., TAKAI H., JOHNSEN J.O., METZ J.H.M., KOERKAMP P.W.G.G., UENK G.H., PHILLIPS V.R., HOLDEN M.R., SNEATH R.W., SHORT J.L., WHITE R.P., HARTUNG J., SEEDORF J., SCHRODER M., LINKERT K.H., WATHES C.M., 1998. A comparison of three balance methods for calculating ventilation rates in livestock buildings. *J Agr Eng Res* 70(1), 25-37.

-
- PHILLIPS V.R., LEE D.S., SCHOLTENS R., GARLAND J.A., SNEATH R.W., 2001. A review of methods for measuring emission rates of ammonia from livestock buildings and slurry on manure stores, Part 2: monitoring flux rates, concentrations and airflow rates. *J Agr Eng Res* 78(1), 1-14.
- RESANO M., EGUINDA P., MAEZTU F., 2006. Control ambiental en alojamientos ganaderos de Navarra. *Itg ganadero*, 57-63.
- SELVA X., 1999. Detectores de gases: Nuevas tecnologías en el infrarrojo. Conferencia de la sección Española de ISA 1999. 3-4.
- SMITH, B. C., 1996. Fundamentals of Fourier transform infrared spectroscopy., Boca Raton. CRC Press., pp. 1-202.
- SST, 2010. Ultra low power carbon dioxide sensor. SST sensing Ltd. 6 pág.
- SST, 2011. CO₂S-PPM software user's guide. SST sensing Ltd. 16 pág.
- VAN OUWERKERK E.N.J., PERDENSEN S., 1994. Application of the carbon dioxide mass balance method to evaluate ventilation rates in livestock buildings. Proc XII World Congress on Agricultural Engineering. Milan, Italy, Aug 31-Sep 2. pp. 516-529.
- WU T.T., GOO S.K., KWONG K.H., MICHIE C., ANDONOVIC I., 2009. Wireless sensor network for cattle monitoring system. *GIL Jahrestagung*, Vol. 142 GI. pp 173-176.