



Evolución de la concentración de NH_3 en función de la temperatura de consigna en alojamientos porcinos de transición

M.R. Rodríguez¹, E. Losada², R. Besteiro¹, T. Arango¹, M.D. Fernández¹

¹ Departamento de Enxeñaría Agroforestal, Universidad de Santiago de Compostela;
manuelramiro.rodriguez@usc.es

² Xunta de Galicia. Consellería de Educación e Ordenación Universitaria

Resumen: Las explotaciones porcinas de transición requieren unas condiciones ambientales muy estrictas y cambiantes, controladas fundamentalmente mediante la modificación de la temperatura de consigna (TS). En la actualidad, la concentración de NH_3 no es una variable ambiental comúnmente utilizada en el control, aunque es particularmente relevante ya que su repercusión en la calidad del aire afecta al medioambiente, al bienestar animal y a la salud de los trabajadores. Este trabajo tiene como objetivo determinar la influencia de la TS sobre la evolución diaria de la concentración de NH_3 en la zona animal. Se llevó a cabo un ensayo experimental, en una granja convencional, con la estrategia de control ambiental basada en la temperatura. La concentración de NH_3 en la zona animal depende de la TS ya que controla el funcionamiento del sistema de ventilación, el cual elimina eficazmente el NH_3 del alojamiento debido a su volatilidad. Las máximas concentraciones de NH_3 se producen durante la noche y las mínimas durante el día, respondiendo a un ajuste sinusoidal, con valores de R^2 entre 0.71 y 0.93. Una disminución en TS origina un retraso de la onda y una disminución de su amplitud. Estas ecuaciones permitirán estimar las concentraciones de NH_3 , pudiendo ser implementadas en controladores convencionales para el control ambiental en tiempo real, lo que proporcionará una mejora ambiental, del bienestar animal y de la productividad.

Palabras clave: Variación diaria, patrón sinusoidal, control ambiental, zona animal

1. Introducción

La liberación de amoníaco (NH_3) en los alojamientos para ganado se origina a partir del contenido de nitrógeno en la orina y las heces depositadas en las fosas o en la superficie del alojamiento, con o sin material de cama [6]. Este gas, junto con el sulfuro de hidrógeno (H_2S) es uno de los gases contaminantes más importantes en la producción porcina actual [8, 34, 45] por su relación directa con el bienestar de los animales y los trabajadores [26, 34, 45, 46]. Numerosos estudios se han llevado a cabo sobre los efectos de la concentración de amoníaco en el comportamiento, la salud y la productividad de los animales [11, 13, 14, 16, 27, 29, 40, 42]. Generalmente, los efectos negativos de las altas concentraciones de NH_3 sobre el estado fisiológico de los cerdos en términos de crecimiento y de salud son reconocidos, pero los resultados experimentales no han sido consistentes. Así, se obtuvieron distintas conclusiones entre los estudios de [16] y [11] o entre los de [27] y [40].

Sin embargo, fueron obtenidas concentraciones de NH_3 muy superiores a las habituales en alojamientos, comprobando disminuciones en el crecimiento del cerdo entre el 12 y el 30% [14]. Por otra parte, se concluyó que en cerdos entre 20 y 85 kg de p.v. debería haber poca

preocupación, en términos de rendimiento, para concentraciones dentro de los límites legales actuales de la Unión Europea, aunque, cuando éstas superaban los 20 ppm, podrían tener una influencia adversa en el bienestar [27]. Asimismo, durante la fase de transición, otros autores no encontraron efectos directos sobre el crecimiento y la eficiencia de conversión de los alimentos [42], ni sobre la salud respiratoria [13].

Desde el punto de vista ambiental, el mayor impacto de la producción animal son los olores y el NH_3 [8, 21]. Las emisiones de NH_3 a la atmósfera y su deposición en el ambiente juegan un papel crucial en la acidificación y eutrofización de los ecosistemas y contribuye a las emisiones indirectas de óxido nitroso [35]. Los efectos adversos, como la eutrofización y acidificación de los ecosistemas [24], van a provocar la reducción de la biodiversidad [12], constituyendo un importante precursor de la formación de partículas finas en la atmósfera [4, 5, 19]. En las proximidades de las granjas de cerdos se observaron concentraciones ambientales importantes [15, 22, 44].

El NH_3 es importante para determinar la calidad del aire en el alojamiento y, en consecuencia, contribuye de forma importante al bienestar animal y a la duración de los equipos e instalaciones [43], por lo que constituye una preocupación en el control ambiental. La mayoría de los países europeos han enfatizado la importancia de la reducción del amoníaco y del olor para limitar su impacto negativo en el medio ambiente y en la sociedad local [34].

Las concentraciones de NH_3 en alojamientos porcinos pueden variar mucho y se relacionan, entre otros factores, con la edad, actividad y densidad de los animales, la temperatura exterior, el control de la ventilación, la hora del día y la época del año [26, 36, 41]. Aunque el rango típico de concentraciones de NH_3 en los alojamientos para cerdos de engorde es de 0 a 40 ppm [18], numerosos autores obtuvieron valores promedio mucho más bajos, entre 12.10 y 18.20 ppm [20], 6.50 ppm [34] e incluso entre 2.10 y 3.40 ppm en el verano y entre 4.20 y 4.30 ppm en el invierno, en salas experimentales con sistema de fosa parcialmente ventilada [47].

Debido a las reducciones en las tasas de ventilación, como consecuencia del incremento de la temperatura exterior, se observaron variaciones estacionales en las concentraciones de NH_3 , con valores, en general, más altos en invierno que en verano [26, 31, 44, 47]. Sin embargo, otros autores obtuvieron resultados opuestos, destacando que las circunstancias que aumentan las tasas de generación tienen un mayor efecto sobre las concentraciones que los factores que reducen las tasas de concentración [3]. Justificados por idéntico motivo, la reducción de las tasas de ventilación, numerosos autores informaron de mayores concentraciones de NH_3 durante la noche o a primeras horas del día y entre las 16:00 y las 20:00 h debido a la acumulación de purín en la fosa [26, 41]. La concentración de NH_3 no mostró un patrón diario obvio, comprobando que los picos más bajos tendieron a ser durante la mitad de la noche [2]. Este estudio demostró, contrariamente a la creencia general de la estrecha asociación con las tasas de ventilación, que los niveles de NH_3 están más estrechamente asociados con los niveles de evaporación, los que se encuentran en el máximo a temperaturas más altas. Los requerimientos térmicos en la fase de transición pueden llegar a descender más de 10°C a lo largo del ciclo [23, 25, 32], generalmente controlados por sistemas convencionales constituidos por instalaciones de calefacción y ventilación reguladas por uno o más sensores de temperatura [39], sin control directo de otros parámetros como la humedad relativa u otros contaminantes [28]. En este trabajo se pretende determinar los patrones de variación diaria de la concentración de NH_3 en la zona ocupada por los animales en edificios de transición y su variación con la temperatura de consigna establecida en el control de los sistemas de climatización. Con ello se persigue que los sistemas convencionales de control, con la temperatura como única variable, puedan considerar la concentración de NH_3 aplicando un algoritmo sencillo basado en variables propias del sistema de climatización. Como resultado, los sistemas de control ambiental contribuirían a la

disminución del impacto ambiental de la producción ganadera [38] al tiempo que proporcionarían un estándar más alto de bienestar animal [17] manteniendo la productividad.

Esto profundizará en los resultados de estudios anteriores, donde se investigaron las concentraciones y emisiones de NH_3 , en alojamientos de distintas especies, y sus factores influyentes para verificar los niveles de contaminación y diseñar estrategias de reducción [7, 9, 10, 30, 33, 37].

2. Materiales y métodos

El estudio se llevó a cabo en una explotación convencional, con una capacidad autorizada de 4895 cerdas para la producción de lechones de 20 kg de p.v. La granja está situada en Abegondo, A Coruña ($43^{\circ}10'12''\text{N}$, $8^{\circ}19'30''\text{W}$), donde las temperaturas son suaves y las heladas infrecuentes (temperatura media anual de 13.20°C , humedad relativa media anual del 86.67% y 17 días de helada en el año 2013, Meteogalicia). La prueba experimental se realizó en una sala de transición, donde los lechones entran con un peso medio de 6 kg y salen con 20 kg de p.v. Las dimensiones interiores de la sala, con suelo de rejilla de polipropileno, son de 11.82 m de largo por 5.86 m de ancho y una altura entre 2.25 y 2.50 m. La sala dispone de seis corrales, a ambos lados del pasillo central, y alberga un máximo de 300 lechones, a razón de 50 lechones por corral. La fosa de purín estaba vacía al principio del ciclo y las operaciones de manejo del mismo se limitaron a su extracción al final del ciclo.

El sistema de climatización fue el propio de la explotación. Está constituido por las instalaciones de ventilación y calefacción por suelo radiante de agua caliente. El control ambiental del alojamiento fue mediante sonda de temperatura sin alteración con respecto a las condiciones de la explotación. El sistema de ventilación está compuesto por un extractor helicoidal, de 500 mm de diámetro, con las siguientes especificaciones: 230 V AC, 50 Hz, 1330 rpm, 480 W de potencia, $\cos \varphi = 0.96$, $8746 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$. El sistema de calefacción por suelo radiante está compuesto por dos placas para agua caliente, de poliéster, de $1.20 \times 0.40 \text{ m}$ y una capacidad de 2.90 l cada una. El rango de temperaturas del fluido calefactor osciló entre 37 y 41°C . Se realizó una regulación manual del caudal de entrada del fluido calefactor en las fechas de modificación de las temperaturas de consigna (TS) para la ventilación. Las TS definidas para el control ambiental estuvieron entre 26 y 23°C , disminuyendo con la edad y el peso de los animales. El aire fresco entraba a la sala a través de dos ventanas con deflectores de aire en la pared opuesta al ventilador, a ambos lados de la puerta de entrada a la sala.

Las variables ambientales medidas en el interior del alojamiento y los sensores empleados fueron:

- Concentración de NH_3 en la zona animal (C_{NH_3}): detector electroquímico, con rango de medición de 0 a 100 ppm, 5% de precisión, compensación de temperatura y autocero calibrado por el fabricante antes de su instalación, modelo ST – IAM IP66 con protección contra salpicaduras (Murco Ltd, Dublín, Irlanda), implementado con filtro de partículas (malla de 0.168 mm de luz e hilo de 0.110 mm).
- Humedad relativa (RH_{az}) y temperatura (T_{az}) en la zona animal: sensor de temperatura y humedad relativa, con rangos de medición de -40 a 75°C , precisión $\pm 0.21^{\circ}\text{C}$ de 0°C a 50°C , y de 0% - 100%, precisión de $\pm 2.50\%$ de 10 a 90% (sensor modelo S-THB-M008, Onset Computer Corporation, Bourne, MA, EE UU).
- Temperatura del aire en el pasillo exterior de la sala (T_{ac}): sensores de coeficiente de temperatura negativo, modelo 107, con rango de medición de -35 a 50°C y error de intercambiabilidad del termistor $\leq \pm 0.20^{\circ}\text{C}$ de 0°C a 50°C (Campbell Scientific Ltd., Loughborough, Reino Unido).

Los sensores utilizados para medir la humedad relativa (RH_{az}), la concentración de NH_3 (C_{NH_3}) y la temperatura en la zona animal (T_{az}) se instalaron en un corral central, a 0.40 m de altura, en el interior de una estructura metálica que protegía los equipos contra las agresiones

de los animales (Figura 1). El sensor utilizado para medir la temperatura del aire en el pasillo exterior (T_{ac}) se colocó en la entrada de aire a la sala, 2.40 m de altura (Figura 1). Esta temperatura fue utilizada para caracterizar el clima exterior, junto con la temperatura exterior (T_{ao}), obtenida con datos proporcionados por la red pública de estaciones meteorológicas, Meteogalicia, estación de Abegondo, A Coruña (43°24'14''N, 8°26'22''W; altitud: 94 m).

Tabla 1. Temperaturas de consigna para el control ambiental y periodos de medición

	Temperatura de consigna (TS) (°C)			
	26	25	24	23
Fecha de inicio	2 Mar.	8 Mar.	19 Mar.	27 Mar.
Fecha de finalización	6 Mar.	17 Mar.	25 Mar.	7 Apr.
Nº de días	5	10	7	12

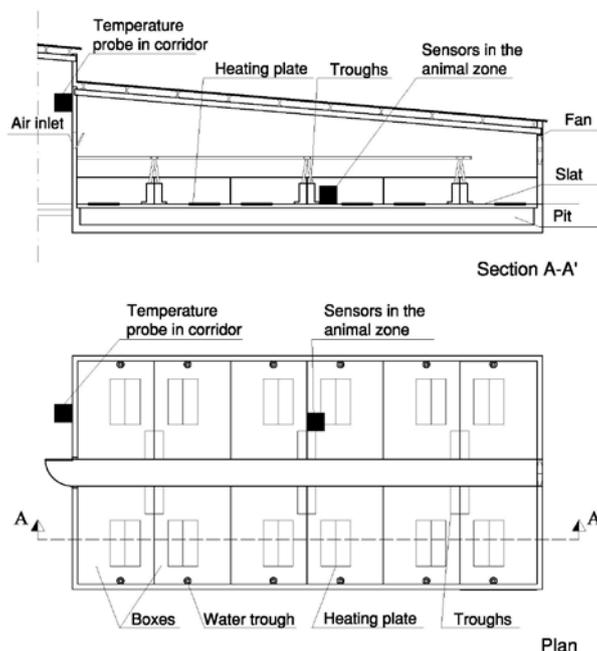


Figura 1. Localización de los sensores empleados para la medición de las distintas variables.

Las temperaturas medias medidas con la sonda de temperatura 107 se almacenaron en un colector de datos CR-10X (Campbell Scientific Ltd., Loughborough, Reino Unido). Las C_{NH_3} , RH_{az} , T_{az} y la tensión y la intensidad proporcionada al ventilador se almacenaron en un colector de datos HOBO H – 22 (Onset Computer Corporation, Bourne, MA, EE UU). Todas las variables se muestrearon a intervalos de 1 segundo y se almacenó su media cada 600 s.

2.1. Análisis matemático

Para cada temperatura de consigna, se realizó la media de las concentraciones de NH_3 , cada diez minutos, obteniendo una evolución diaria media, la cual se ajustó mediante la siguiente expresión:

$$C_{NH_3}(t) = A \sin(\omega t + \varphi) + B \quad (3)$$

donde:

C_{NH_3} : concentración NH_3 (ppm)

A: amplitud (ppm)

Ω : velocidad angular (rad min⁻¹)

Φ : ángulo de fase inicial (rad)

B: variable independiente o variación vertical (ppm)

Para ajustar la serie de valores de concentración de NH₃ a la ecuación 3, los valores característicos de A, ω , φ y B se obtuvieron de las siguientes ecuaciones:

$$A = \frac{C_{NH_3MAX} - C_{NH_3MIN}}{2} \quad (4)$$

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = 4.36E - 3 \quad (5)$$

$$\varphi = \omega t_0 \quad (6)$$

$$B = C_{NH_3AVE} = \frac{\sum_1^n C_{NH_3i}}{n} \quad (7)$$

donde:

C_{NH_3MAX} : concentración máxima de NH₃ en la zona ocupada por los animales (ppm)

C_{NH_3MIN} : concentración mínima de NH₃ en la zona ocupada por los animales (ppm)

T: período de la onda, 1440 min

t_0 : tiempo durante el cual la onda toma el valor promedio (min)

$B=C_{NH_3AVE}$: concentración media diaria de NH₃ en la zona ocupada por animales (ppm)

El tiempo, t_0 , se considera positivo si la onda está adelantada o negativo si la onda se retrasa. La hora aproximada se obtuvo a partir de los datos experimentales, a través de los cuales fue maximizado el coeficiente de determinación R² para el ajuste senoidal de la función.

La bondad de ajuste se define por el coeficiente de determinación (R²), el error cuadrático medio (RMSE) y la desviación estándar del error (SDE), en ppm. Las expresiones de RMSE y SDE se pueden escribir como:

$$RMSE = \left(\frac{1}{N} \sum_1^N (C_{NH_3C} - C_{NH_3M})^2 \right)^{0.5} \quad (8)$$

$$SDE = \left[\frac{1}{N} \left(\sum_1^N (C_{NH_3C} - C_{NH_3M})^2 - \left(\sum_1^N (C_{NH_3C} - C_{NH_3M}) \right)^2 \right) \right]^{0.5} \quad (9)$$

donde:

N: número de observaciones

C_{NH_3C} : concentración calculada de NH₃ (ppm)

C_{NH_3M} : concentración medida de NH₃ (ppm)

3. Resultados

Se ha analizado la evolución diaria de la concentración de NH₃ en la zona animal en un alojamiento de transición, donde los animales permanecieron 44 días. Durante este tiempo los animales pasaron de un peso medio de 5.36 a 20.34 kg de p.v. Los requisitos térmicos en esta fase son muy estrictos y cambiantes, por lo que la temperatura de consigna se ha modificado siguiendo el proceso productivo habitual. Los días en los que se modificó esta temperatura no se tuvieron en cuenta en el análisis, ya que las instalaciones de calefacción y ventilación estuvieron controladas por dos temperaturas distintas.

La menor densidad del NH₃ con respecto del aire lo sitúa en las zonas más altas de la sala, siendo más fácilmente extraíble, al contrario que otros gases, como el CO₂, que se acumulan en las capas más bajas. Por tanto, la evolución de la concentración de NH₃ se ve muy afectada por la ventilación, que a su vez va a estar condicionada por las temperaturas de consigna definidas, las cuales oscilaron entre 26 y 23°C, disminuyendo con la edad y el peso de los animales.

Los días analizados se agruparon según la temperatura de consigna establecida (tabla 2). En general, las concentraciones medias de NH₃ disminuyeron con esta temperatura y oscilaron entre 3.79 y 0.30 ppm para 26 y 23°C respectivamente. Sin embargo, cuando la temperatura de consigna fue de 25°C, la concentración media de NH₃ fue de 5.24 ppm. Además, se puede

comprobar una fuerte reducción de las concentraciones de NH₃ cuando la temperatura de consigna baja a 24 y 23°C.

Tabla 2. Valores estadísticos para variables ambientales a diferentes temperaturas de consigna

TS (°C)	C _{NH3} (ppm)				RH _{az} (%)	T _{az} (°C)	T _{ac} (°C)	T _{ao} (°C)
	AVE	SD	MAX	MIN				
26	3.79	2.48	6.84	1.38	58	28.07	14.51	11.74
25	5.24	2.55	7.82	2.45	57	27.88	10.74	8.33
24	1.00	0.78	2.00	0.25	59	26.56	10.97	10.69
23	0.30	0.48	0.72	0.05	61	24.56	11.05	10.88

donde:

TS: temperatura de consigna

C_{NH3}: concentración de NH₃

RH_{az}: humedad relativa en la zona animal

T_{az}: temperatura en la zona animal

T_{ac}: temperatura en el pasillo exterior de la sala

T_{ao}: temperatura ambiente exterior

AVE: media

SD: desviación estándar

MAX: máximo

MIN: mínimo

Por otra parte, la concentración media de NH₃ mostró un comportamiento inverso a la humedad relativa, para todas las temperaturas que se ajusta por mínimos cuadrados a una función potencial (Figura 2).

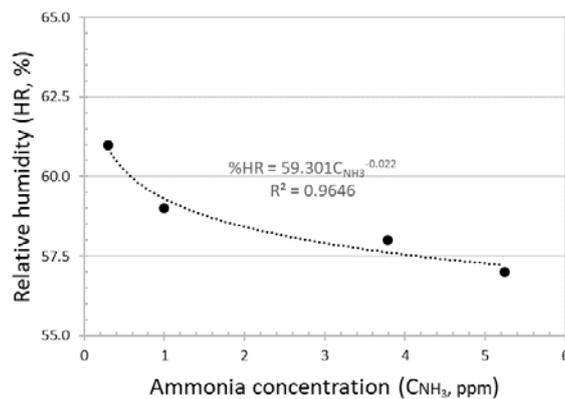


Figura 2. Ajuste exponencial de la concentración de NH₃ y la HR en la zona animal.

Vista la evolución diaria de la concentración de NH₃ (Figura 3) se procedió a su ajuste a una función sinusoidal. Para ello se determinaron la amplitud (A), el ángulo de fase inicial (φ) y el valor medio (B) de la onda sinusoidal. La tabla 3 resume los valores obtenidos para cada temperatura de consigna (Figura 4).

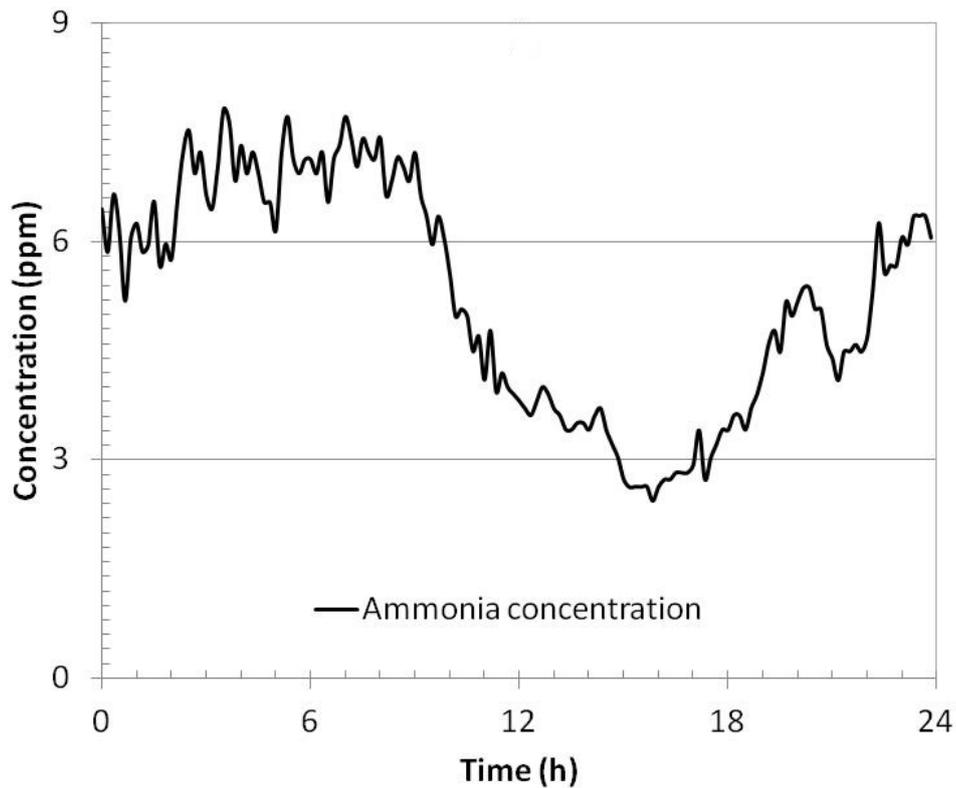


Figura 3. Evolución diaria de la concentración media de NH_3 en la zona animal para una temperatura de consigna de 25°C.

Tabla 3. Valores característicos de la curva sinusoidal a diferentes temperaturas de consigna

TS (°C)	A (ppm)	B (ppm)	φ (rad)	Hora de inicio da onda
26	2.73	3.79	0.26	23:00 h
25	2.69	5.24	0.44	22:20 h
24	0.87	1.00	-0.17	00:40 h
23	0.33	0.30	-0.31	01:10 h

donde:

TS: temperatura de consigna

A: amplitud

Φ : ángulo de fase inicial

B: variable independiente o variación vertical obtenido como concentración media diaria de NH_3 en la zona animal.

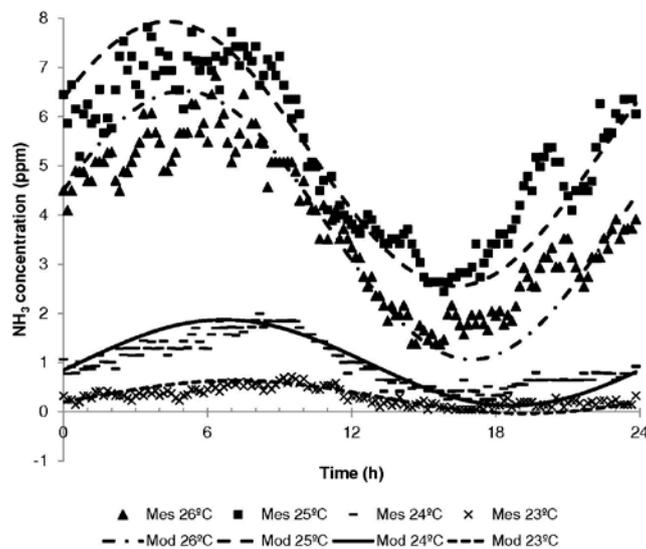


Figura 4. Ajuste sinusoidal modelizado (Mod) y medido (Mes) para la evolución diaria de la concentración de NH_3 a diferentes temperaturas de consigna.

La amplitud de la función sinusoidal disminuyó con la temperatura de consigna debido a los niveles más bajos de concentración de NH_3 . Sin embargo, casi no hubo diferencia entre los valores obtenidos para las temperaturas de consigna de 26 y 25°C, en torno a 2.70 ppm, mientras que la amplitud disminuyó drásticamente a temperaturas de consigna más bajas, alcanzando 0.33 ppm para la temperatura de 23°C. Además, la temperatura en la zona animal fue superior a la temperatura de consigna, en todos los casos, con valores superiores a los 1.50°C (Tabla 2), lo que muestra la inercia térmica de la instalación de calefacción.

El ángulo de fase inicial fue positivo para las temperaturas de consigna de 26 y 25°C y negativo para 24 y 23°C. Para la temperatura de consigna de 26 y 25°C, la concentración inicial de NH_3 fue superior a su valor promedio en un 19% y 22%, respectivamente. Para las temperaturas de consigna de 24 y 23°C, la concentración inicial fue un 15 y un 34% menor que la concentración media, respectivamente.

Los estadísticos resumidos en la tabla 4 muestran la bondad del ajuste del patrón sinusoidal a los datos de variación diaria de la concentración de NH_3 en edificios de transición en función de la temperatura de consigna.

Tabla 4. Ajuste de la evolución diaria de la concentración de NH_3 a una curva sinusoidal, a diferentes temperaturas de consigna

TS (°C)	R ²	SDE (ppm)	RMSE (ppm)	RME (%)
26	0.93	0.64	0.64	-5
25	0.88	0.70	0.70	-1
24	0.84	0.26	0.26	-6
23	0.71	0.13	0.13	-9

donde:

TS: temperatura de consigna

SDE: desviación estándar del error

RMSE: error cuadrático medio

RME: error medio relativo.

El grado de ajuste de los datos a una función sinusoidal se caracterizó por el coeficiente de determinación, R^2 , que mostró valores razonables, en el rango de 0.71 a 0.93 para las temperaturas de consigna de 23 y 26°C, respectivamente. Los valores de R^2 aumentaron con la TS, lo que sugiere un mejor ajuste y mayores variaciones para altas concentraciones de NH_3 . Estos resultados fueron respaldados por otros estadísticos, entre las cuales la desviación estándar del error (SDE) osciló entre 0.70 y 0.13. Los errores medios relativos (RME) están en el rango de -1 a -9%.

4. Discusión

La temperatura ambiental recomendada para lechones destetados alojados en corrales con el suelo de enrejado plástico varía de 30–32°C para 5 kg de peso vivo a 19–25°C para 20 kg de peso vivo [25, 32]. Numerosos autores [26, 41] relacionaron el efecto de la temperatura de consigna sobre la concentración de NH_3 por su influencia en la ventilación y, en consecuencia, en la eliminación de NH_3 del edificio. Durante los primeros días de la fase de transición, los cuales se corresponden con el período crítico, con una duración aproximada de dos semanas [23], con temperaturas de consigna de 26 y 25°C, la ventilación fue fuertemente restringida debido a los estrictos requisitos térmicos para el crecimiento de los lechones y su susceptibilidad a las corrientes de aire. Es en este período cuando se producen las mayores concentraciones de NH_3 . Durante el período poscrítico, donde ya se establece la ingesta regular de alimentos [23], con temperaturas de consigna de 24 y 23°C y en consecuencia menores restricciones en la ventilación, la concentración de NH_3 disminuye considerablemente, pasando de valores medios de 5.24 a 1.00 ppm para 25 y 24°C de temperatura de consigna respectivamente. Estas bajadas de la temperatura de consigna, de 25 a 23°C supuso una disminución en la temperatura media en el alojamiento 1.32 y 2.00°C, respectivamente, sin que las temperaturas exterior y del pasillo muestren grandes diferencias (2.55 y 0.31°C respectivamente). Además, como se muestra en la Tabla 2, la temperatura en la zona ocupada por los animales (T_{az}) fue siempre superior a la temperatura de consigna, variando entre 2.07 y 1.56°C para temperaturas de consigna de 26 y 23°C respectivamente, lo que muestra la inercia térmica de la instalación de calefacción. Es decir, se observa una mejor respuesta de la instalación de control ambiental con temperaturas de consigna más bajas.

Por otra parte, la concentración media de NH_3 también mostró un comportamiento inverso a la humedad relativa, en consonancia con [2], donde se demostró que los niveles de NH_3 están más estrechamente asociados con los niveles de evaporación que a la tasa de ventilación, los cuales se encuentran en el máximo a temperaturas más altas.

Numerosos autores midieron concentraciones superiores a las presentadas en este trabajo, aunque en cerdos de mayor edad. Para cerdos, con un peso inicial de 36.80 kg, se midieron concentraciones medias de 0.83 ± 0.68 ppm [41]. Con anterioridad, se presentaron valores promedio de NH_3 entre 12.10 y 18.20 ppm en el norte de Europa [20]. Otros autores obtuvieron una concentración promedio de 6.50 ppm a partir de la medición en las etapas iniciales y medias del período de engorde [33]. Por otra parte, en salas experimentales con sistema de fosa parcialmente ventilada, se obtuvieron valores mucho más bajos, de 2.10 a 3.40 ppm en verano y de 4.20 a 4.30 ppm en el invierno [47]. Un intervalo entre 1.80 y 13.90 ppm fue medido en diferentes alojamientos de ganado porcino [2]. Todos estos valores fueron superiores a los obtenidos durante el último período analizado en este documento, donde los animales, con un peso aproximado de 20 kg, se acercaron más a las condiciones para los cerdos de engorde, con valores de 0.30 ± 0.48 ppm para una temperatura de consigna de 23°C.

La evolución diaria de la concentración de NH_3 difirió considerablemente del patrón observado en las condiciones de laboratorio para cerdos en engorde, con ventilación mediante sistemas de presión negativa [41]. En ese trabajo las concentraciones de NH_3 eran más altas antes de las 07:00 h, luego disminuían por la eliminación diaria de estiércol por la mañana,

umentaban nuevamente siguiendo el incremento de temperatura hasta que se alcanzaba el valor máximo entre las 13:00 h y las 14:00 h, y finalmente disminuían con la temperatura. Por lo tanto, y al contrario que nuestro trabajo, sus resultados muestran una evolución diaria de la concentración de amoníaco paralela a la temperatura, con la única excepción de la retirada del purín. Dichas diferencias pueden deberse principalmente a las diferencias en los sistemas de ventilación y limpieza. En la prueba experimental realizada, el sistema de ventilación forzada eliminó efectivamente el NH_3 al mediodía, evitando así una tendencia de concentración de NH_3 paralela a la tendencia de la temperatura del aire. Además, la eliminación diaria de estiércol afectó bruscamente la evolución diaria de la concentración de NH_3 [41], que no fue el caso de nuestro estudio.

Los resultados de nuestra prueba experimental sugieren una respuesta sinusoidal para la evolución diaria de la concentración de NH_3 , que está de acuerdo con los resultados obtenidos para conejos [9]. De manera similar, encontramos una respuesta sinusoidal para la concentración diaria de NH_3 , la cual estaba directamente relacionada con la emisión de olores y otros contaminantes de los edificios de cerdos de engorde [36]. Además, la actividad diaria de los animales se incorporó como una ecuación sinusoidal para predecir la emisión de NH_3 de los edificios para ganado vacuno de leche con ventilación natural [33], quienes encontraron que, la inclusión del seno y el coseno de las variables circulares, como las horas del día, los días del año y la dirección del viento, mejoró la naturaleza dinámica de los modelos utilizados para predecir la emisión de NH_3 . Además, se encontraron patrones senoidales claros para la emisión diaria de NH_3 para pollos de engorde por [10].

La evolución diaria de la concentración de NH_3 en los edificios de destete mostró un patrón similar a la evolución encontrada en las granjas de conejos [9], con valores máximos por la noche cuando las tasas de ventilación eran mínimas y valores mínimos durante el día cuando las tasas de ventilación máximas. Por lo tanto, la respuesta sinusoidal estuvo fuertemente condicionada por las tasas de ventilación dentro del edificio, que fueron controladas por la temperatura interior. Este patrón afectó a la emisión de NH_3 , que siguió la tendencia opuesta a la concentración de NH_3 y aumentó al incrementarse las tasas de ventilación. Como resultado, la emisión de NH_3 fue mayor durante el día [10, 33].

En general, una disminución en la temperatura de consigna causó una disminución en la amplitud de la función sinusoidal modelada y un retraso en la onda. Sin embargo, casi no hubo diferencia de amplitud en el ajuste para las temperaturas de 26 y 25°C, en torno a 2.70 ppm. Sin embargo, la amplitud disminuyó bruscamente a temperaturas de consigna más bajas (0.33 ppm a 23°C). Esto está en consonancia con el hecho de que las altas temperaturas, junto con elevados pH en la cama, conducen a considerables emisiones de NH_3 [1].

En base a esto, y teniendo en cuenta la inercia térmica de la instalación de calefacción y que las temperaturas en la zona animal son superiores a las establecidas como consigna, deben de establecerse temperaturas para el control ambiental inferiores a las temperaturas deseadas en la zona animal. Esta actuación va a tener dos efectos favorables, por una parte la mejora de la eficiencia térmica de la instalación de calefacción y, por otra, una menor concentración de NH_3 como consecuencia de las temperaturas ambientales más bajas.

La SDE fue el componente principal del error, porque el sesgo tuvo un resultado nulo debido a que la media de los datos experimentales coincide con la media de la curva senoidal obtenida en un período (1440 min). Entonces, el RMSE igualó el valor de la SDE. La onda sinusoidal para la concentración de NH_3 en granjas porcinas proporciona un patrón fiable que podría implementarse para su estimación en tiempo real e incluirse como un parámetro en las estrategias de control. Esto es particularmente relevante porque la concentración de NH_3 está directamente relacionada con la temperatura de consigna, que es el elemento más importante del control del clima.

5. Conclusiones

Las siguientes conclusiones pueden ser extraídas del análisis de los resultados de la prueba experimental realizada en un edificio de destete con control de los sistemas de calefacción y ventilación basado en la temperatura:

1.- La concentración de NH₃ en la zona animal varió con la temperatura de consigna establecida para el sistema de climatización entre 5.24 y 0.30 ppm. En período nocturno, con las temperaturas exteriores más bajas, la tasa de ventilación es más reducida, lo que da lugar a incrementos en la concentración de NH₃. El aumento de la temperatura exterior durante el día aumenta la tasa de ventilación y por tanto la extracción del gas.

2.- La onda sinusoidal diaria para la concentración de NH₃ proporciona un patrón fiable para cada temperatura de consigna, con valores de R² entre 0.93 y 0.71. La amplitud de la onda disminuye y, en general, la onda sinusoidal se retrasa con la disminución de la temperatura de consigna.

3.- El uso de ecuaciones sinusoidales para estimar la concentración de NH₃ puede ser de interés para los ganaderos, en la medida en que proporcionan información de los niveles del gas. Debido a que la simplicidad de la ecuación permite su implementación en muchos controladores convencionales, las ecuaciones sinusoidales en función de la temperatura de consigna podrían ser de gran utilidad para el control ambiental en tiempo real, lo que mejoraría considerablemente el bienestar animal.

4.- Dado que las concentraciones de NH₃ se reducen con temperaturas más bajas, y teniendo en cuenta la inercia térmica de la instalación de calefacción, podrían establecerse temperaturas de consigna inferiores a las temperaturas deseadas en la zona animal, con la consecuente reducción de la concentración de NH₃ y mejora de la eficiencia energética de la granja.

6. Agradecimientos

El presente trabajo ha sido financiado por la Xunta de Galicia y el Fondo Europeo de Desarrollo Regional (FEDER), a través del proyecto de investigación *Estrategias de control y automatización para la eficiencia energética y productiva en explotaciones porcinas de destete*, perteneciente a los programas sectoriales de investigación aplicada, PEME I+D Suma del Plan Gallego de Investigación, Desarrollo e Innovación Tecnológica, en el marco del programa operativo FEDER Galicia 2007-2013.

Referencias

1. Andersson M. Performance of bedding materials in affecting ammonia emissions from pig manure. *Journal of Agricultural Engineering Research*. 1996, 65(3), (213 - 222).
2. Banhazi T.M. Seasonal, diurnal and spatial variations of environmental variables in Australian livestock buildings. *Australian Journal of Multi-disciplinary Engineering*. 2013, 10(1), (60 - 69).
3. Banhazi T., Seedorf J., Rutley D., Pitchford W. Identification of risk factors for suboptimal house conditions in Australian Piggeries: Part 3. Environmental Parameters *Journal of Agricultural Safety and Health*. 2008, 14(1), (41 - 52).
4. Backes A., Aulinger A., Bieser J., Matthias V., Quante M. Ammonia emissions in Europe, part I: Development of a dynamical ammonia emission inventory. *Atmospheric Environment*. 2016a, 131, (55 - 66).
5. Backes A.M., Aulinger A., Bieser J., Matthias V., Quante M. Ammonia emissions in Europe, part II: How ammonia emission abatement strategies affect secondary aerosols. *Atmospheric Environment*. 2016b, 126, (153 - 161).

X CONGRESO IBÉRICO DE AGROINGENIERÍA
X CONGRESSO IBÉRICO DE AGROENGENHARIA

3 – 6 septiembre 2019, Huesca - España

6. Bjerg B., Norton T., Banhazi T., Zhang G., Bartzanas T., Liberati P., Cascone G., Lee B., Marucci A. Modelling of ammonia emissions from naturally ventilated livestock buildings. Part 1: Ammonia release modelling. *Biosystems Engineering*. 2013, 116(3), (232 - 245).
7. Blanes-Vidal V., Hansen M.N., Pedersen S., Rom, H.B. Emissions of ammonia, methane and nitrous oxide from pig houses and slurry: Effects of rooting material, animal activity and ventilation flow. *Agriculture, Ecosystems & Environment*. 2008, 124(3-4), (237 - 244).
8. Blanes-Vidal V., Nadimi E.S., Ellermann T., Andersen H.V., Løfstrøm P. Perceived annoyance from environmental odors and association with atmospheric ammonia levels in non-urban residential communities: a cross-sectional study. *Environmental Health*. 2012, 11(1), (11 - 27).
9. Calvet S., Cambra-López M., Estellés F., Torres A.G. Characterization of the indoor environment and gas emissions in rabbit farms. *World Rabbit Science*. 2011a, 19 (1), (49 - 61).
10. Calvet S., Cambra-López M., Estellés F., Torres, A.G. Characterization of gas emissions from a Mediterranean broiler farm. *Poultry Science*. 2011b, 90(3), (534 - 542).
11. Cheng Z., O'Connor E.A., Jia Q., Demmers T.G.M., Wathes C.M., Wathes D.C. Chronic ammonia exposure does not influence hepatic gene expression in growing pigs. *Animal*. 2014, 8(2), (331-337).
12. Clark C.M., Tilman D. Loss of plant species after chronic low-level nitrogen deposition to prairie grasslands. *Nature*. 2008, 451, (712 - 715).
13. Done S.H., Chennells D.J., Gresham A.C.J., Williamson S., Hunt B., Taylor L.L., Bland V., Jones P., Armstrong D., White R.P., Demmers T.G.M., Teer N., Wathes, C.M. Clinical and pathological responses of weaned pigs to atmospheric ammonia and dust. *Veterinary Record*. 2005, 157(3), (71-80).
14. Drummond J.G., Curtis S.E., Simon J., Norton, H.W. Effects of aerial ammonia on growth and health of young pigs. *Journal Animal Science*. 1980, 50(6), (1085 - 1091).
15. Geels C., Andersen H.V., Ambelas Skjøth C., Christensen J.H., Ellermann T., Løfstrøm P., Gyldenkerne S., Brandt J., Hansen J.B., Frohn L.M., Hertel, O. Improved modelling of atmospheric ammonia over Denmark using the coupled modelling system DAMOS. *Biogeosciences*. 2012, 9(7), (2625 - 2647).
16. Hamilton T.D.C., Roe J.M., Hayes C.M., Webster A.J.F. Effects of ammonia inhalation and acetic acid pretreatment on colonization kinetics of toxigenic *Pasteurella multocida* within upper respiratory tracts of swine. *Journal of Clinical Microbiology*. 1998, 36(5), (1260 - 1265).
17. Hamon L., Andrès Y., Dumont E. Aerial pollutants in swine buildings: A review of their characterization and methods to reduce them. *Environmental Science & Technology*. 2012, 46(22), (12287 - 12301).
18. Heber A.J., Tao P.C., Ni J.Q., Lim T.T., Schmidt A.M. Air emissions from two swine finishing building with flushing: ammonia characteristics. In *Livestock Environment VII*. American Society of Agricultural and Biological Engineers, Michigan, USA. 2005, (436 - 443).
19. Hendriks C., Kranenburg R., Kuenen J., van Gijlswijk R., Kruit R.W., Segers A., van der Gon H.D., Schaap M. The origin of ambient particulate matter concentrations in the Netherlands. *Atmospheric Environment*. 2013, 69, (289 - 303).
20. Koerkamp P.G., Metz J.H.M., Uenk G.H., Phillips V.R., Holden M.R., Sneath R.W., Short J.L., White R.P., Hartung J., Seedorf J., Schröder M., Linkert K.H., Pedersen S., Takai H, Johnsen J.O., Wathes C.M. Concentrations and emissions of ammonia in livestock buildings in Northern Europe. *Journal of Agricultural Engineering Research*. 1998, 70(1), (79 - 95).
21. Krupa S.V. Effects of atmospheric ammonia (NH₃) on terrestrial vegetation: a review. *Environmental Pollution*. 2003, 124(2), (179 - 221).
22. Kryza M., Dore A.J., Błaś M., Sobik M. Modelling deposition and air concentration of reduced nitrogen in Poland and sensitivity to variability in annual meteorology. *Journal of Environmental Management*. 2011, 92(4), (1225 - 1236).
23. Le Dividich J., Herpin P. Effects of climatic conditions on the performance, metabolism and health-status of weaned piglets: a review. *Livestock Production Science*. 1994, 38(2), (79 - 90).
24. Liu X., Zhang Y., Han W., Tang A., Shen J., Cui Z., Vitousek P., Erisman J.W., Goulding K., Christie P., Fangmeier A., Zhang F. Enhanced nitrogen deposition over China. *Nature*. 2013, 494, (459 - 462).

X CONGRESO IBÉRICO DE AGROINGENIERÍA
X CONGRESSO IBÉRICO DE AGROENGENHARIA

3 – 6 septiembre 2019, Huesca - España

25. Múirhead M.R., Alexander T.J.L. Managing health and disease. In *Managing pig health and de treatment of disease: a reference for the farm*. 5M Enterprises, Sheffield, UK. 1997, (55 - 104).
26. Ni J.Q., Heber A.J., Lim T.T. Ammonia and hydrogen sulfide in swine production. In *Air Quality and Livestock Farming*. CRC Press, Florida, USA. 2018, (69 - 88).
27. O'Connor E.A., Parker M.O., McLeman M.A., Demmers T.G., Lowe J.C., Cui L., Davey E.L., Owen R.C., Wathes C.M., Abeyesinghe S.M. The impact of chronic environmental stressors on growing pigs, *Sus scrofa* (Part 1): stress physiology, production and play behaviour. *Animal*. 2010, 4(11), (1899 - 1909).
28. Park J.H., Peters T.M., Altmaier R., Sawvel R.A., Renée Anthony T. Simulation of air quality and cost to ventilate swine farrowing facilities in winter. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2013, 98, (136 - 145).
29. Parker M.O., O'Connor E.A., McLeman M.A., Demmers T.G.M., Lowe J.C., Owen R.C., Davey E.L., Wathes C.M., Abeyesinghe, S.M. The impact of chronic environmental stressors on growing pigs, *Sus scrofa* (Part 2): social behaviour. *Animal*. 2010, 4(11), (1910 - 1921).
30. Philippe F.X., Cabaraux J.F., Nicks B. Ammonia emissions from pig houses: Influencing factors and mitigation techniques. *Agriculture, Ecosystems & Environment*. 2011, 141, (245 - 260).
31. Raynor P.C., Engelman S., Murphy D., Ramachandran G., Bender J.B., Alexander B.H. Effects of gestation pens versus stalls and wet versus dry feed on air contaminants in swine production. *Journal of Agromedicine*. 2018, 23(1), (40 - 51).
32. Rinaldo D., Le Dividich J. Assessment of optimal temperature for performance and chemical body composition of growing pigs. *Livestock Production Science*. 1991, 29(1), (61 - 75).
33. Saha C.K., Ammon C., Berg W., Fiedler M., Loebstin C., Sanftleben P., Brunsch R., Amon T. Seasonal and diel variations of ammonia and methane emissions from a naturally ventilated dairy building and the associated factors influencing emissions. *Science of the Total Environment*. 2014, 468, (53 - 62).
34. Saha C.K., Zhang G., Kai P., Bjerg B. Effects of a partial pit ventilation system on indoor air quality and ammonia emission from a fattening pig room. *Biosystems Engineering*. 2010, 105(3), (279 - 287).
35. Schauburger G., Piringer M., Mikovits C., Zollitsch W., Hörtenhuber S.J., Baumgartner J., Niebuhr K., Anders I, Andre K, Hennig-Pauka I, Schönhart M. Impact of global warming on the odour and ammonia emissions of livestock buildings used for fattening pigs. *Biosystems Engineering*. 2018, 175, (106 - 114).
36. Schauburger G., Piringer M., Petz E. Diurnal and annual variation of odour emission from animal houses: a model calculation for fattening pigs. *Journal of Agricultural Engineering Research*. 1999, 74(3), (251 - 259).
37. Takai H., Nimmermark S., Banhazi T., Norton T., Jacobson L.D., Calvet S., Hassouna M., Bjerg B., Zhang G.Q., Pedersen S., Kai P., Wang K., Berckmans D. Airborne pollutant emissions from naturally ventilated buildings: Proposed research directions. *Biosystems Engineering*. 2013, 116, (214 - 220).
38. Van Ransbeeck N., Van Langenhove H., Van Weyenberg S., Maes D., Demeyer P. Typical indoor concentrations and emission rates of particulate matter at building level: a case study to setup a measuring strategy for pig fattening facilities. *Biosystems Engineering*. 2012, 111(3), (280 - 289).
39. Van Wagenberg A.V., Metz J.H.M., den Hartog L.A. Methods for evaluation of the thermal environment in the animal-occupied zone for weaned piglets. *Transactions of the ASABE*. 2005, 48(6), (2323 - 2332).
40. Von Borell E., Özpınar A., Eslinger K.M., Schnitz A.L., Zhao Y., Mitloehner F.M. Acute and prolonged effects of ammonia on hematological variables, stress responses, performance, and behavior of nursery pigs. *Journal of Swine Health and Production*. 2007, 15(3), (137 - 145).
41. Wang K., Wei B., Zhu S., Ye Z. Ammonia and odor emitted from deep litter and fully slatted floor systems for growing-finishing pigs. *Biosystems Engineering*. 2011, 109(3), (203 - 210).
42. Wathes C.M., Demmers T.G.M., Teer N., White R.P., Taylor L.L., Bland V., Jones P., Armstrong D., Greshan A.C.J., Hartung J., Chennells D.J., Done S.H. Production responses of weaned pigs after chronic exposure to airborne dust and ammonia. *Animal Science*. 2004, 78(1), (87 - 97).

X CONGRESO IBÉRICO DE AGROINGENIERÍA
X CONGRESSO IBÉRICO DE AGROENGENHARIA

3 – 6 septiembre 2019, Huesca - España

43. Webb J., Menzi H., Pain B.F., Misselbrook T.H., Dämmgen U., Hendriks H., Döhler H. Managing ammonia emissions from livestock production in Europe. *Environmental Pollution*. 2005, 135(3), (399 - 406).
44. Xu W., Zheng K., Liu X., Meng L., Huaitalla R.M., Shen J., Hartung E., Gallmann E., Roelcke M., Zhang F. Atmospheric NH₃ dynamics at a typical pig farm in China and their implications. *Atmospheric Pollution Research*. 2014, 5(3), (455 - 463).
45. Ye Z., Zhang G., Li B., Strøm J.S., Dahl P.J. Ammonia emissions affected by airflow in a model pig house: effects of ventilation rate, floor slat opening, and headspace height in a manure storage pit. *Transactions of the ASABE*. 2008, 51(6), (2113 - 2122).
46. Zhang G., Strøm J.S., Li B., Rom H.B., Morsing S., Dahl P., Wang C. Emission of ammonia and other contaminant gases from naturally ventilated dairy cattle buildings. *Biosystems Engineering*. 2005, 92(3), (355 - 364).
47. Zong C., Li H., Zhang G. Ammonia and greenhouse gas emissions from fattening pig house with two types of partial pit ventilation systems. *Agriculture, Ecosystems & Environment*. 2015, 208, (94 - 105).