

UNIVERSIDAD POLITECNICA DE VALENCIA

Departamento de Ciencia Animal



DISEÑO Y PUESTA EN FUNCIONAMIENTO DE UNA CÁMARA DINÁMICA PARA EL REGISTRO DE EMISIONES DE GASES PROCEDENTES DE ESTIÉRCOLES Y PEQUEÑOS ANIMALES

TESINA FINAL DE MÁSTER

Alumno:

Fernando Estellés Barber

Director Académico:

D. Salvador Calvet Sanz

Valencia, Octubre de 2007

Agradecimientos

A todo el personal de la granja, a María, Marta, Vero, Irene, Yolanda, M^a Carmen y seguro que me dejo a alguien...muchas gracias! Andrés, grato reencuentro, simplemente perfecto, esto no estaría aquí sin ti, Gracias!!.Salva... menos mal que estás aquí! Gracias por TODO. Antonio, gracias, sobre todo por haberme permitido llegar hasta aquí. La familia no se me olvida (tooooooooooooooooooda, que va creciendo) anda que no le echáis paciencia...jeje, gracias! Y lo mejor, como siempre al final...Arantxa, ya no se que más decir, podría escribir otras 100 páginas, pero a lo mejor se hacía pesado...simplemente gracias, por todo, por ayudarme en el trabajo, y por hacerme feliz, además de soportarme!!!

La vida es lo que ocurre mientras estamos ocupados en hacer otros planes

(John Lennon)

GLOSARIO DE TÉRMINOS

Gases

| | |
|------------------|---------------------|
| NH ₃ | Amoniaco |
| CH ₄ | Metano |
| CO | Monóxido de Carbono |
| CO ₂ | Dióxido de Carbono |
| HFC | Hidrofluorocarburos |
| N ₂ O | Óxido Nitroso |
| PFC | Perfluorocarburos |

Siglas de organismos

| | |
|-------------|---|
| CIGR | Commission Internationale du Génie Rural |
| EPA | Environment Protection Agency |
| EMEP | European Monitoring and Evaluation Program |
| IPCC | International Panel for Climate Change Convention |
| UNFCCC/CMCC | Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático |
| UPV | Universidad Politécnica de Valencia |

Términos generales

| | |
|------|------------------------------|
| AGV | Ácidos Grasos Volátiles |
| FTIR | Fourier transformed infrared |
| GEI | Gases de Efecto Invernadero |
| NDIR | Non-dispersive infrared |
| PAS | Photoacoustic spectrsocopy |
| ppm | Partes por millón |

ÍNDICE

| | | |
|------------|--|-----------|
| 1 | INTRODUCCIÓN..... | 1 |
| 1.1 | Contexto general | 1 |
| 1.2 | La contaminación atmosférica y los sistemas de producción ganaderos | 2 |
| 1.2.1 | <i>Efectos ambientales de amoníaco</i> | <i>3</i> |
| 1.2.2 | <i>Efectos ambientales de los gases de efecto invernadero</i> | <i>8</i> |
| 1.3 | Consideraciones previas acerca de la medición de las emisiones | 18 |
| 1.3.1 | <i>Unidades de medida.....</i> | <i>18</i> |
| 1.3.2 | <i>Medición de las emisiones</i> | <i>19</i> |
| 1.4 | Objetivos | 32 |
| 2 | DISEÑO DE LA CÁMARA | 35 |
| 2.1 | Introducción..... | 35 |
| 2.1.1 | <i>Cámaras dinámicas.....</i> | <i>35</i> |
| 2.1.2 | <i>Cámaras estáticas.....</i> | <i>36</i> |
| 2.2 | Materiales y métodos | 37 |
| 2.2.1 | <i>Tamaño de la cámara.....</i> | <i>38</i> |
| 2.2.2 | <i>Morfología de la cámara.....</i> | <i>38</i> |
| 2.2.3 | <i>Material constructivo.....</i> | <i>39</i> |
| 2.2.4 | <i>Régimen de ventilación</i> | <i>40</i> |
| 2.3 | Resultados | 43 |
| 2.3.1 | <i>Morfología.....</i> | <i>43</i> |
| 2.3.2 | <i>Tamaño</i> | <i>43</i> |
| 2.3.3 | <i>Materiales</i> | <i>43</i> |
| 2.3.4 | <i>Ventilación</i> | <i>44</i> |
| 2.4 | Discusión | 46 |
| 2.4.1 | <i>Morfología.....</i> | <i>46</i> |
| 2.4.2 | <i>Tamaño</i> | <i>47</i> |
| 2.4.3 | <i>Materiales.....</i> | <i>47</i> |
| 2.4.4 | <i>Ventilación</i> | <i>47</i> |
| 3 | PUESTA EN FUNCIONAMIENTO DE LA CÁMARA | 49 |
| 3.1 | Introducción..... | 49 |

| | | |
|------------|--|-----------|
| 3.1.1 | <i>Producción de CO₂ por parte de los animales.....</i> | <i>49</i> |
| 3.1.2 | <i>Balances de dióxido de carbono</i> | <i>53</i> |
| 3.2 | Materiales y métodos | 56 |
| 3.2.1 | <i>Planteamiento metodológico general</i> | <i>56</i> |
| 3.2.2 | <i>Determinación del caudal de trabajo</i> | <i>56</i> |
| 3.2.3 | <i>Cálculo de las emisiones. Balance de dióxido de carbono</i> | <i>60</i> |
| 3.2.4 | <i>Calendario del experimento.....</i> | <i>66</i> |
| 3.2.5 | <i>Análisis estadístico</i> | <i>67</i> |
| 3.3 | Resultados | 68 |
| 3.3.1 | <i>Determinación del caudal de trabajo</i> | <i>68</i> |
| 3.3.2 | <i>Cálculo de las emisiones. Balance de dióxido de carbono</i> | <i>72</i> |
| 3.3.3 | <i>Relación de las emisiones con la temperatura</i> | <i>76</i> |
| 3.4 | Discusión | 78 |
| 3.4.1 | <i>Metodología empleada</i> | <i>78</i> |
| 3.4.2 | <i>Emisiones de dióxido de carbono.....</i> | <i>78</i> |
| 3.5 | Implicaciones de futuro | 79 |
| 4 | CONCLUSIONES..... | 81 |
| 5 | BIBLIOGRAFÍA..... | 83 |

ÍNDICE DE TABLAS

| | |
|--|----|
| Tabla 1. Principales características de los gases responsables del cambio climático | 10 |
| Tabla 2. Concentraciones máxima y mínima recomendadas para la medida de gases | 41 |
| Tabla 3. Concentraciones atmosféricas medias de algunos gases..... | 41 |
| Tabla 4. Emisiones de gases procedentes de estiércol de pollos y purín de porcino | 42 |
| Tabla 5. Peso de los conejos y duración de cada prueba en cámara cerrada..... | 68 |
| Tabla 6. Tasas de emisión de CO ₂ de los conejos calculadas en cámara cerrada..... | 70 |
| Tabla 7. Caudales mínimos calculados para cada kg de peso metabólico | 70 |
| Tabla 8. Crecimiento y consumos de los conejos del experimento en cámara dinámica | 72 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| <i>Figura 1.</i> Efectos del amoníaco sobre las plantas y factores implicados..... | 5 |
| <i>Figura 2.</i> Efectos producidos según la concentración de NH ₃ y el tiempo de exposición..... | 6 |
| <i>Figura 3.</i> Factores que afectan a la salud y el bienestar de los animales | 7 |
| <i>Figura 4.</i> Esquema básico del efecto invernadero..... | 8 |
| <i>Figura 5.</i> Espectro de emisión de la radiación solar y terrestre | 9 |
| <i>Figura 6.</i> Penetración de la radiación solar en la Tierra | 9 |
| <i>Figura 7.</i> Absorbancia en la atmósfera | 10 |
| <i>Figura 8.</i> Contribución parcial (%) de los diferentes GEI al efecto invernadero | 11 |
| <i>Figura 9.</i> Evolución temporal de la concentración de CO ₂ en la atmósfera..... | 12 |
| <i>Figura 10.</i> Evolución de la concentración de CH ₄ en la atmósfera | 13 |
| <i>Figura 11.</i> Tendencias en la evolución de la concentración de CH ₄ en la atmósfera..... | 13 |
| <i>Figura 12.</i> Espectro de absorción de radiación en la atmósfera..... | 14 |
| <i>Figura 13.</i> Tendencias en la evolución de la concentración de N ₂ O en la atmósfera..... | 15 |
| <i>Figura 14.</i> Esquema de la construcción de una cámara estática | 21 |
| <i>Figura 15.</i> Esquema constructivo de una cámara dinámica | 22 |
| <i>Figura 16.</i> Técnica micrometeorológica de balance de flujo transversal. | 23 |
| <i>Figura 17.</i> Esquema constructivo de un equipo NDIR..... | 26 |
| <i>Figura 18.</i> Esquema constructivo de un equipo FTIR y procesamiento de datos..... | 27 |
| <i>Figura 19.</i> Esquema de un detector de gases fotoacústico | 28 |
| <i>Figura 20.</i> Esquema constructivo y aspecto externo del difusor pasivo | 30 |
| <i>Figura 21.</i> Componentes y esquema constructivo de un sistema de captura ácida..... | 31 |
| <i>Figura 22.</i> Proceso de decisión seguido para el diseño de la cámara..... | 38 |
| <i>Figura 23.</i> Esquema de la morfología de la cámara | 43 |
| <i>Figura 24.</i> Dimensiones de la cámara | 43 |
| <i>Figura 25.</i> Fotografía de la cámara en la que se observan los materiales constructivos | 44 |
| <i>Figura 26.</i> Conc. de CO ₂ a varios caudales para emisiones de pollos y conejos..... | 44 |

| | |
|---|-----------|
| <i>Figura 27. Conc. de gases a varios caudales para emisiones de estiércoles y purines</i> | <i>45</i> |
| <i>Figura 28. Fermentación entérica en rumiantes</i> | <i>51</i> |
| <i>Figura 29. Descomposición de la materia orgánica en condiciones anaerobias</i> | <i>52</i> |
| <i>Figura 30. Actividad diaria relativa en pollos de engorde</i> | <i>55</i> |
| <i>Figura 31. Detalle del sellado de la cámara</i> | <i>56</i> |
| <i>Figura 32. Experimento en cámara cerrada.....</i> | <i>57</i> |
| <i>Figura 33. Montaje electrónico para la reducción de voltaje.....</i> | <i>58</i> |
| <i>Figura 34. Conexión a jack estéreo</i> | <i>59</i> |
| <i>Figura 35. Componentes del balance de gases en la cámara dinámica</i> | <i>60</i> |
| <i>Figura 36. Localización de la cámara y el equipo adjunto en la nave.....</i> | <i>62</i> |
| <i>Figura 37. Bomba y ventilador instalados en la cámara</i> | <i>62</i> |
| <i>Figura 38. Vista cenital del interior de la cámara</i> | <i>63</i> |
| <i>Figura 39. Detalle de la localización de la sonda de T^a y HR en el interior de la cámara.....</i> | <i>64</i> |
| <i>Figura 40. Detalle de la localización de la sonda de T^a y HR en el exterior de la cámara.....</i> | <i>65</i> |
| <i>Figura 41. Detalle de la colocación del sensor de dióxido de carbono</i> | <i>65</i> |
| <i>Figura 42. Temperatura registrada en el interior de la cámara cerrada.....</i> | <i>68</i> |
| <i>Figura 43. Humedad relativa registrada en la cámara cerrada.....</i> | <i>69</i> |
| <i>Figura 44. Concentración de dióxido de carbono registrada en la cámara cerrada</i> | <i>69</i> |
| <i>Figura 45. Evolución de la concentración de CO₂ en para diferentes caudales</i> | <i>70</i> |
| <i>Figura 46. Concentración exterior de CO₂ durante la determinación del caudal</i> | <i>71</i> |
| <i>Figura 47. Determinación del caudal de funcionamiento (I).....</i> | <i>71</i> |
| <i>Figura 48. Determinación del caudal de funcionamiento (II).....</i> | <i>72</i> |
| <i>Figura 49. Temperaturas registradas durante el balance de dióxido de carbono.....</i> | <i>73</i> |
| <i>Figura 50. Humedades relativas registradas durante el balance de dióxido de carbono</i> | <i>73</i> |
| <i>Figura 51. Concentraciones exteriores durante el balance de dióxido de carbono</i> | <i>74</i> |
| <i>Figura 52. Concentraciones medias exteriores durante el balance de CO₂</i> | <i>74</i> |
| <i>Figura 53. Concentraciones interiores durante el balance de CO₂.....</i> | <i>75</i> |
| <i>Figura 54. Emisiones de dióxido de carbono medias a lo largo del día.....</i> | <i>75</i> |

Figura 55. Modelización de las emisiones horarias de CO₂.....76

Figura 56. Relación entre las emisiones de CO₂ y la t^a en la cámara dinámica77

Figura 57. Emisiones de dióxido de carbono corregidas por t^a.....77

1 INTRODUCCIÓN

1.1 CONTEXTO GENERAL

El efecto pernicioso causado por las actividades antropogénicas sobre el medio ambiente es evidente. Esto ha motivado una cierta preocupación y sensibilización social que finalmente se está traduciendo en la implantación de determinadas exigencias legales para la protección del medio ambiente.

La ganadería, como actividad productiva, no es ajena a esa situación de problemática ambiental de las sociedades industrializadas y de elevado desarrollo tecnológico, como es el caso de la española, siendo una de las fuentes generadoras de impacto sobre el medio ambiente.

Desde una perspectiva amplia, la incidencia medioambiental de la ganadería se puede enmarcar en tres grandes ámbitos:

- La utilización de recursos, que extrae del entorno.
- La producción de residuos, sólidos y líquidos, con sus consiguientes riesgos de contaminación.
- Las emisiones de ciertos gases a la atmósfera, que contribuyen a determinados fenómenos de contaminación (v.g.: cambio climático, acidificantes y precursores de ozono, partículas en suspensión, etc.).

La incorporación de medidas que puedan suponer una mejora, desde la perspectiva medioambiental, de estos aspectos o de factores relacionados con ellos se ha convertido en una necesidad en constante crecimiento para el sector ganadero, y en consecuencia para el conjunto del sector agrario, porque la cuestión medioambiental se está convirtiendo en un factor de competitividad por cuanto las exigencias sociales así lo están manifestando y su presión va siendo cada vez mayor.

Ahora bien, previamente a plantear estrategias de mejora, lo primero que hay que tener es un buen conocimiento de la situación existente en ese entorno productivo, en todo lo referente a los aspectos citados, por varias razones:

- Se presentan exigencias legales de origen europeo que ya están incorporadas al ordenamiento jurídico nacional (Directiva 91/676/CE- R.D. 261/96 relativas a la protección de las aguas producidas por nitratos utilizados en agricultura; Directiva 96/61/CE- Ley 16/2002 “IPPC”, relativas a la prevención y al control integrados de la contaminación).

- Se han contraído compromisos políticos por parte del Estado español a nivel internacional en el marco de las emisiones de contaminantes. Así, es necesario como primer paso inventariar las emisiones (v.g.: Inventarios Nacionales de Emisiones, Techos Nacionales de Emisiones), de forma que sea más sencillo cumplir los compromisos de reducción de las mismas y de los residuos contaminantes (v.g.: Protocolo de Kyoto, Directiva 2001/81/CE sobre techos nacionales de emisión, Convenio de Ginebra de contaminación atmosférica transfronteriza) y mejorar su reutilización.
- Resulta necesario en consecuencia, adoptar soluciones apropiadas a la problemática existente.

Obviamente el objetivo final es reducir los impactos y optimizar el uso de los recursos dentro de un marco de desarrollo más sostenible.

Dentro de los impactos negativos anteriormente señalados, cabe destacar por su incipiente impacto mediático, la contaminación atmosférica a causa de la emisión de gases. La ganadería es responsable de la emisión de grandes cantidades de gases con efectos negativos sobre el medio ambiente, como es el caso del amoníaco principalmente, y de los gases de efecto invernadero en menor medida. Así pues, este es uno de los puntos más importantes dentro del ámbito científico-técnico en el sector ganadero en la actualidad.

Hay que añadir en este punto que, los conocimientos científicos sobre los procesos que determinan las emisiones de dichos gases con efectos perniciosos son, en muchas ocasiones, escasos e incluso inexistentes cuando nos centramos en el ámbito de nuestro país, tanto en lo referente a las condiciones ambientales singulares del mismo, como en lo que se refiere a las especies ganaderas que aquí se encuentran y sus sistemas de explotación.

De esta forma, parece imprescindible que las investigaciones científicas en el ámbito de la contaminación atmosférica causada por la actividad ganadera, se centren en la determinación de la realidad de nuestro ámbito espacial, tratando de obtener valores de emisión de contaminantes adecuados, tanto para las especies singulares que se explotan como para los sistemas de explotación utilizados en el caso de especies ganaderas más extendidas.

1.2 LA CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA Y LOS SISTEMAS DE PRODUCCIÓN GANADEROS

Tal y como se ha comentado en el apartado anterior, la producción ganadera es una fuente de contaminación a tener muy en cuenta, ya no únicamente por la elevada incidencia

puntual sobre ciertos factores ambientales susceptibles de ser afectados, sino también por el amplio espectro de factores sobre los que puede afectar de forma negativa.

Uno de los puntos más importantes en lo referente a la contaminación causada por las actividades ganaderas hacer referencia a las reservas de agua, tanto en lo que respecta al consumo de este recurso que se produce, como en la posible contaminación de las reservas (v.g. contaminación por nitratos procedentes de los estiércoles) (Owen, 1994).

También hay que considerar los efectos que tiene la actividad ganadera en la contaminación de suelos (excesos de nutrientes, fitotoxicidad, etc.), y ya no únicamente en la contaminación propiamente dicha, sino en procesos como los cambios de uso del suelo, convirtiéndose zonas forestales en zonas destinadas a la producción agraria.

Por otro lado, es también relevante la capacidad de contaminación de la industria ganadera, sobre la cadena alimenticia, llegando incluso a las personas algunas enfermedades y sustancias no deseadas procedentes de los animales o de las granjas (Owen, 1994).

En lo que se refiere a la contaminación atmosférica, la volatilización del amoníaco procedente de los sistemas de producción ganadera intensiva, contribuye directamente sobre los procesos de formación de lluvia ácida, deposición ácida, eutrofización, etc., además de contribuir de forma indirecta a otros procesos como puede ser la contaminación de aguas por nitratos (Krupa, 2003). También en términos de contaminación atmosférica hay que resaltar el papel del metano y óxido nitroso procedentes de los procesos de producción ganadera, que actúan directamente sobre el fenómeno global del cambio climático (Seinfeld y Pandis, 1998) y pueden alterar los ciclos naturales de carbono en la Tierra (Mackenzie, 1999).

El presente trabajo se centra precisamente en este último apartado, referente a la contaminación atmosférica. Con el fin de alcanzar una mejor comprensión del problema de la contaminación atmosférica que en este trabajo nos atañe, se ha realizado una breve introducción acerca de los efectos contaminantes de los principales gases contaminantes procedentes de la producción ganadera: el amoníaco y los gases de efecto invernadero, que se presenta en los siguientes epígrafes.

1.2.1 Efectos ambientales de amoníaco

El amoníaco es un gas que se produce de forma natural en la troposfera como consecuencia de diversos procesos biológicos relacionados con el ciclo del nitrógeno. Sin embargo, el incremento en su producción por parte de la actividad humana lo convierte en gas contaminante en determinados ámbitos.

Sus efectos en los ecosistemas de deben principalmente a que el amoniaco es una fuente de un elemento esencial para la vida como es el nitrógeno, y a las propiedades físicas y químicas del amoniaco como tal.

Si bien la emisión se produce en forma de amoniaco, la reactividad de este gas hace que sus compuestos secundarios (ión amonio y sales de amonio) produzcan otros efectos y tengan otra dinámica de comportamiento. A continuación, se estudiarán brevemente los efectos del amoniaco gas y de los compuestos derivados.

1.2.1.1 Efectos negativos sobre las plantas

El nitrógeno amoniacal afecta a las plantas de tres formas distintas (Krupa, 2003):

1. **Efectos primarios** sobre el crecimiento: se deben al efecto estimulante del crecimiento que tiene el nitrógeno a bajas concentraciones (alargamiento de entrenudos, acumulación de agua, aumento de la transpiración, etc.). Se detectan estos efectos a concentraciones del orden de 1 ppm durante semanas o meses de exposición.
2. **Efectos secundarios**, que derivan de la estimulación de los efectos primarios: incremento del crecimiento, desequilibrio nutricional, o sensibilidad a estrés por plagas, sequía y heladas.
3. **Efectos tóxicos**: se producen a concentraciones más elevadas de amoniaco, cuando es imposible almacenar o metabolizar el nitrógeno sin que se produzcan daños. Los efectos tóxicos consisten en el desacoplamiento del transporte de electrones, disfunción de las membranas y en daños visibles como por ejemplo necrosis y manchas foliares.

Los tres niveles de actuación se ilustran en la **Figura 1**:

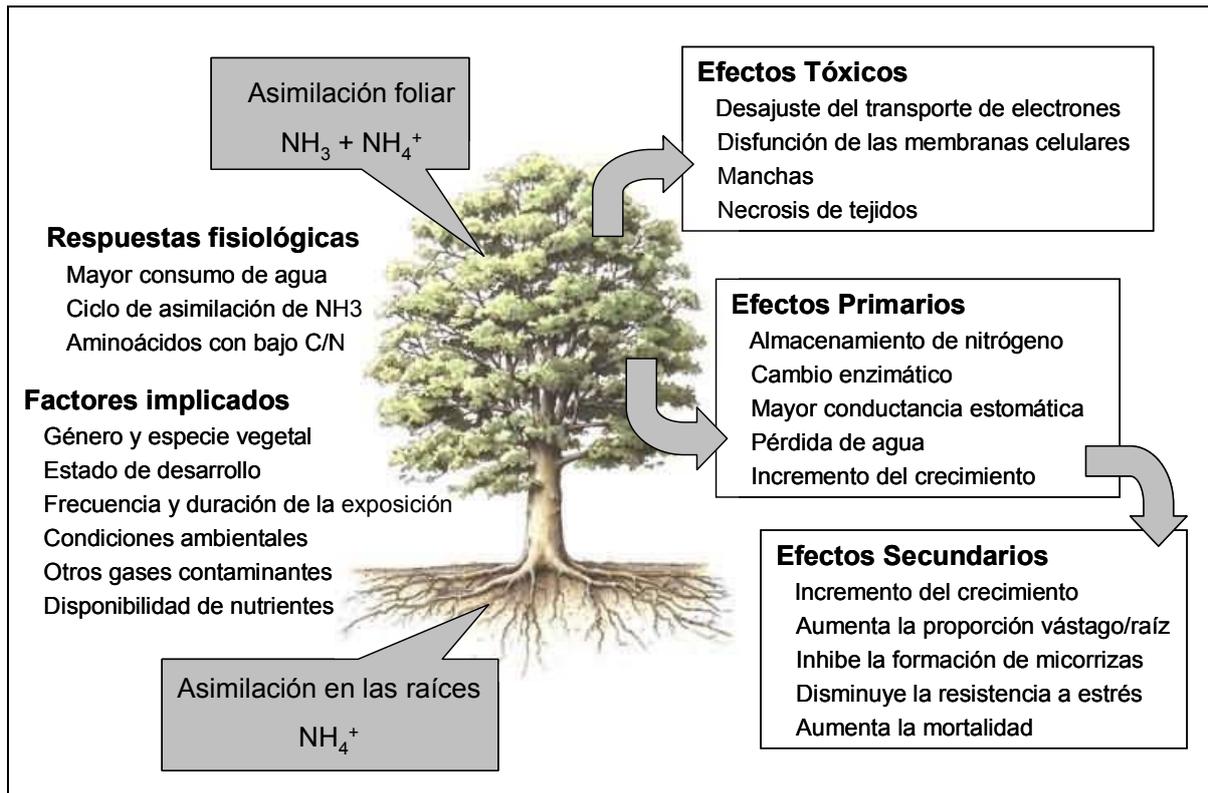


Figura 1. Efectos del amoníaco sobre las plantas y factores implicados

Fuente: Adaptado de Krupa (2003)

1.2.1.2 Efectos ecológicos difusos

El amoníaco antropogénico supone una alteración del equilibrio de los ecosistemas, tanto a través del suelo como de la cobertura vegetal, y produce efectos tales como la eutrofización del agua y la acidificación del suelo (Krupa, 2003). La deposición de nitrógeno gaseoso emitido por las diversas fuentes constituye una fuente considerable de nitrógeno en algunos ecosistemas (entre 60 y 100 kg de nitrógeno por hectárea y año en países del centro de Europa).

1.2.1.3 Efectos negativos sobre la salud humana

El amoníaco es un metabolito esencial para la síntesis de DNA, RNA y proteínas, y es necesario para mantener el equilibrio ácido – base. Se estima que el ser humano produce diariamente 17 gramos de amoníaco, y su exceso es metabolizado en el hígado para formar urea, que finalmente es excretada por el aparato urinario. La concentración en sangre de amoníaco suele oscilar entre 0,7 y 2,0 mg/L (Roney *et al.*, 2004).

Los principales efectos perjudiciales del amoníaco se deben a su carácter irritante y corrosivo en disolución acuosa. La exposición a amoníaco causa irritación por quemadura en el tracto respiratorio, piel y ojos.

Los efectos producidos dependen de la combinación entre la concentración de amoníaco a la que un individuo está sometido, la duración de la exposición y la sensibilidad del propio individuo. La **Figura 2** refleja la severidad de los daños producidos en función de la concentración de amoníaco y del tiempo de exposición:

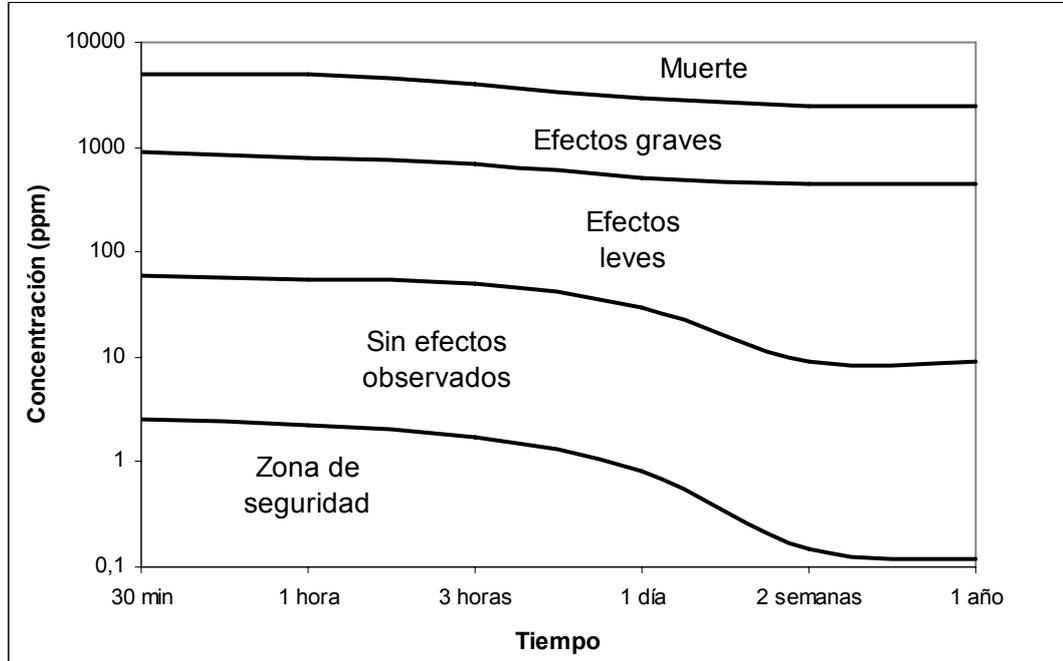


Figura 2. Efectos producidos según la concentración de NH_3 y el tiempo de exposición

Fuente: Adaptado de Roney et al. (2004)

1.2.1.4 Efectos negativos sobre animales

Igual que en las personas, el amoníaco puede influir en la salud y el bienestar animal de dos formas diferentes: la primera es por toxicidad aguda, y efectos crónicos.

La toxicidad aguda es un efecto directo y a corto plazo causado por una elevada concentración de amoníaco, que se manifiesta en daños al animal (especialmente en las mucosas) y cambios de comportamiento.

Los efectos crónicos se deben a la exposición prolongada a bajas concentraciones de amoníaco, y se manifiesta principalmente en forma de enfermedades respiratorias y daños permanentes en las mucosas.

A veces, sin embargo, se habla de enfermedades multifactoriales; en ellas existen varios factores externos implicados en la aparición de una enfermedad (Wathes y Charles, 1994), sin que haya uno que pueda considerarse el desencadenante de la enfermedad por sí solo, tal como se observa en la **Figura 3**.

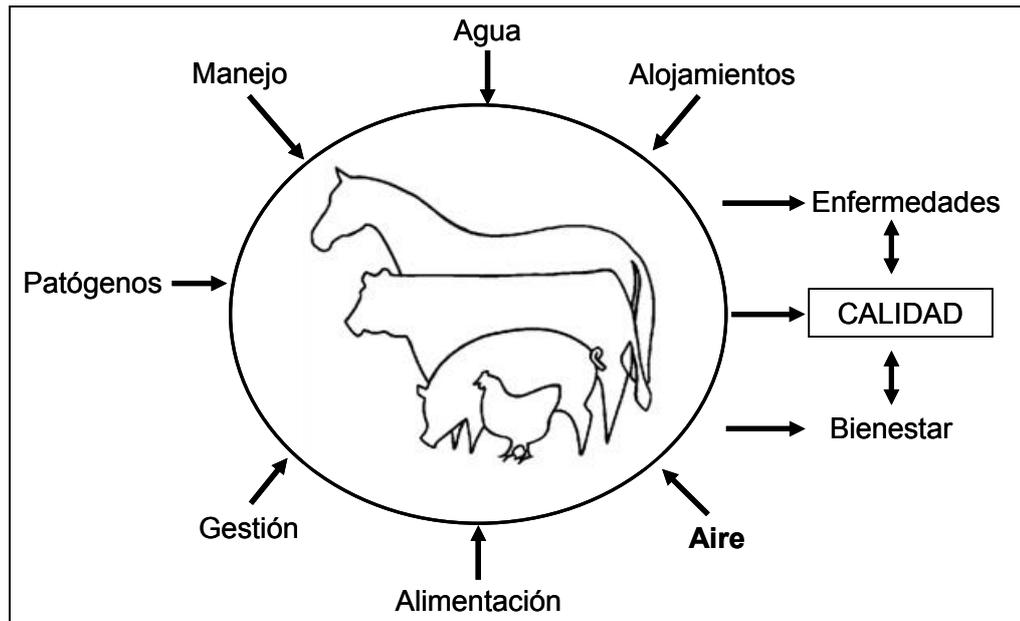


Figura 3. Factores que afectan a la salud y el bienestar de los animales

Fuente: Wathes y Charles (1994)

La higiene del aire en los alojamientos ganaderos depende en gran medida de la ventilación, y la implicación sobre la sanidad animal no sólo se debe a la acumulación de amoniaco, sino también a la producción de otros gases, a la elevada humedad relativa, el crecimiento de patógenos y la producción de fermentaciones en los residuos.

El límite de exposición al amoniaco por parte de los animales se ha establecido entre 20 ppm (Wathes y Charles, 1994) y 25 ppm (Health and Safety Executive) Este límite se ha fijado a partir de un concepto antropogénico de bienestar, de forma que se puede considerarse un valor parcialmente subjetivo.

En general, el amoniaco a elevadas concentraciones (por encima de 50 ppm) produce irritación de las mucosas a corto plazo en todas las especies animales (Roney *et al.*, 2004). La irritación se produce por acción directa del amoniaco, y por deposición de los aerosoles, formados en gran medida por sales de amonio. A más largo plazo, el amoniaco produce irritación en el sistema respiratorio y ocular, con una mayor incidencia de enfermedades respiratorias.

1.2.1.5 Efectos sobre la visibilidad

La producción de amoniaco incrementa la formación de aerosoles, que a su vez disminuyen la calidad de la atmósfera en cuanto a visibilidad, puesto que los aerosoles producen dispersión de la luz (Seinfeld, 1986).

Los efectos son importantes si existe confluencia de aire con contaminación de origen industrial, que contenga óxidos de azufre y de nitrógeno, con aire contaminado por actividad

agrícola intensiva, que suele contener amoníaco. Estas condiciones favorecen la formación de aerosoles con el consiguiente empeoramiento de la visibilidad (Barthelmie y Pryor, 1998).

1.2.2 Efectos ambientales de los gases de efecto invernadero

1.2.2.1 ¿Qué son los gases de efecto invernadero?

Los GEI son constituyentes de la atmósfera que absorben y re-emiten radiaciones. Al resultado final de este proceso se le llama **efecto invernadero**, porque es un proceso parecido al que se produce en un invernadero de cristal, donde entra la luz a través del cristal, pero las radiaciones infrarrojas que se emiten desde el interior no pueden atravesar el mismo cristal, produciéndose un incremento de la temperatura dentro del recinto.

A nivel global, los GEI dejan pasar la radiación visible procedente del Sol pero absorben más del 90% de la radiación infrarroja que emite la Tierra (**Figura 4**).

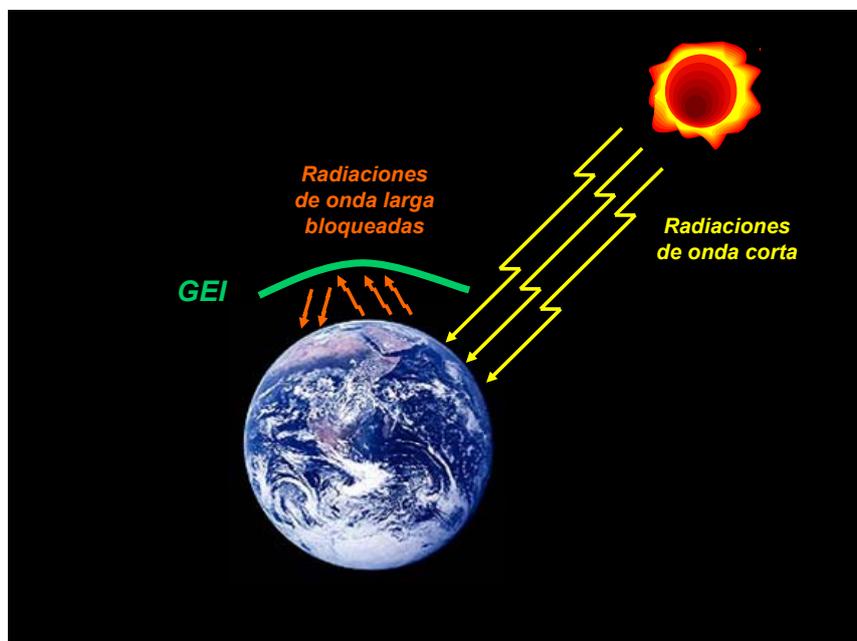


Figura 4. Esquema básico del efecto invernadero

Fuente: Elaboración propia

Resulta muy ilustrativo el estudio de los espectros de emisión de radiaciones, proporcionando la información necesaria para la comprensión global del efecto invernadero.

El sol emite radiación en un amplio espectro que varía principalmente desde 200 hasta más de 2.000 nm, encontrándose las radiaciones de mayor intensidad sobre los 500 nm. Por el contrario, las mayor parte de radiaciones emitidas por la Tierra se producen entre 10.000 y 30.000 nm, dentro del espectro infrarrojo (**Figura 5**).

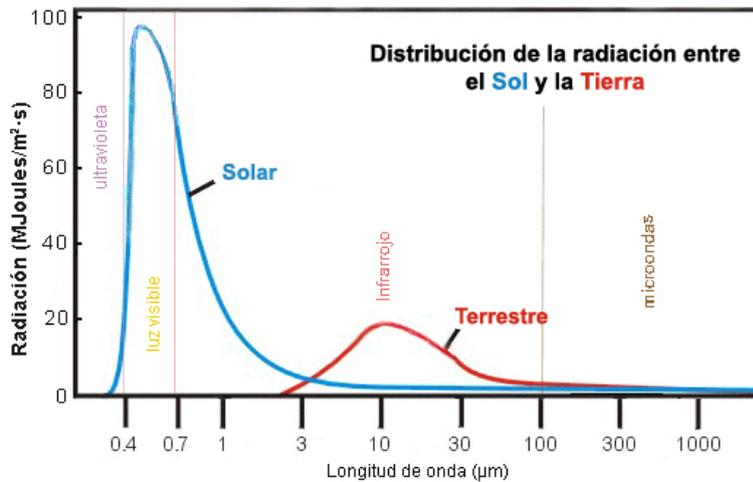


Figura 5. Espectro de emisión de la radiación solar y terrestre

Fuente: Seinfeld y Pandis (1998)

La absorción de esta radiación por parte de los gases que componen la atmósfera es uno de los fenómenos más importantes para la química atmosférica (Seinfeld y Pandis, 1998). Parte de esta absorción se centra en el espectro visible y UV, de forma que se reduce la cantidad de radiación procedente del Sol que llega a la Tierra. Esta función es llevada a cabo principalmente por el ozono en la parte alta de la atmósfera, con lo que la radiación solar es menor al reducirse la distancia con el suelo (**Figura 6**).

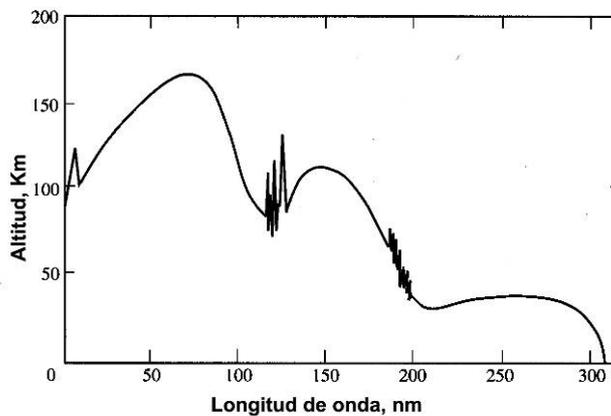


Figura 6. Penetración de la radiación solar en la Tierra

Fuente: Seinfeld y Pandis (1998)

Por otro lado, los gases como el CO_2 y el vapor de agua absorben radiaciones con longitudes de onda mucho mayores, con lo que se sitúan en el espectro infrarrojo evitando la salida de parte de la radiación terrestre hacia el exterior (Seinfeld y Pandis, 1998). La **Figura 7** muestra la absorbancia (de 0 a 1) y los espectros de absorción de los principales gases involucrados en este proceso atmosférico. Se puede observar que, en efecto, el CO_2 y el vapor de agua, junto con el ozono troposférico, tiene un amplio espectro de absorción, y en consecuencia, un gran potencial como GEI (Millán, 2002), por ello estos gases han llamado la atención social y científica de forma muy significativa.

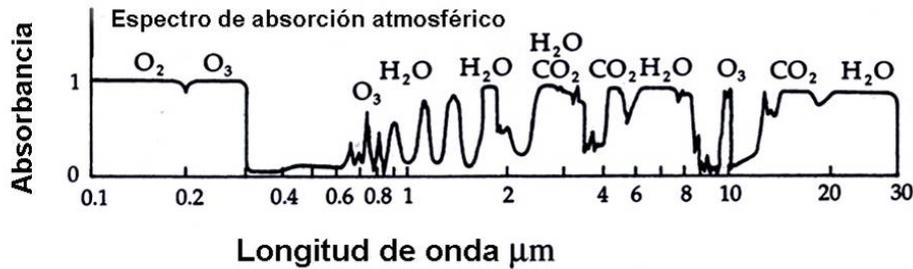


Figura 7. Absorbancia en la atmósfera

Fuente: Seinfeld y Pandis (1998)

De esta forma, un desequilibrio en las concentraciones de los gases que participan en el fenómeno de la absorbancia de radiaciones, puede llevar a un desequilibrio energético entre la Tierra y el exterior.

Los gases de efecto invernadero pueden proceder de varios orígenes y tener naturalezas diferentes entre sí, según su forma de interferir en las reacciones atmosféricas. En la **Tabla 1** se recogen algunos de los gases responsables del cambio climático así como sus principales características.

| Tabla 1. Principales características de los gases responsables del cambio climático | | | | |
|--|---|---|---|--|
| Compuesto | Concentración atmosférica en ppb¹ | Vida media (Wassmann et al., 2000)² | Capacidad de efecto invernadero^{2*} | Modo de acción² |
| O ₃ | 10-200 | - | - | Absorbe radiaciones UV e IR |
| CO ₂ | 356.000 | - | 1 | Absorbe radiación IR y afecta al ozono estratosférico |
| CH ₄ | 1.714 | 12 | 23 | Absorbe radiación IR, afecta al ozono troposférico y estratosférico y al vapor de agua |
| N ₂ O | 311 | 114 | 296 | Absorbe radiación IR y afecta al ozono estratosférico |
| HFC-134 ^a | - | 13,8 | 1.300 | Absorbe radiación IR y afecta al ozono estratosférico |

*Relativo a un Kg. de CO₂
Fuentes:¹(Seinfeld y Pandis, 1998); ²(IPCC, 2001b)

Dentro de estos compuestos, los seis gases principales con efecto invernadero según se recoge en el *Protocolo de Kyoto* son los siguientes:

- Dióxido de Carbono (CO₂)
- Metano (CH₄)
- Óxido Nitroso (N₂O)

- Hidrofluorocarbonos (HFC)
- Perfluorocarbonos (PFC)
- Hexafluoruro de azufre (SF_6)

Los tres primeros compuestos son los más importantes, siendo la contribución relativa de los mismos al proceso global del cambio climático de entre un 50-60 % para el CO_2 , un 15-20 % para el CH_4 (considerando también el efecto invernadero indirecto, véase apartado 1.2.2.1.2) y del orden del 6% para el N_2O (**Figura 8**).

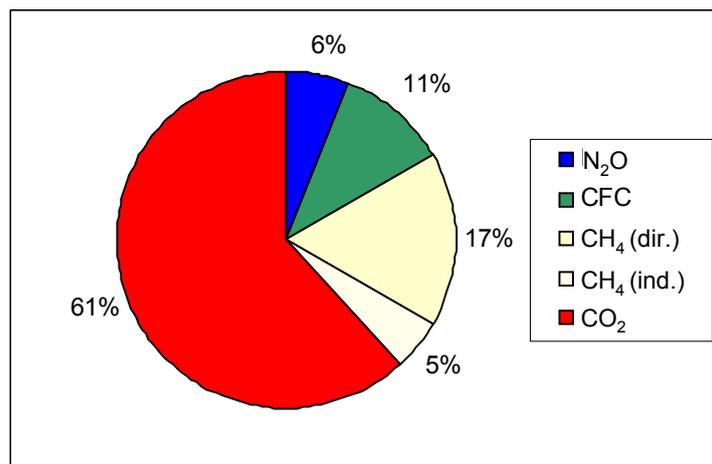


Figura 8. Contribución parcial (%) de los diferentes GEI al efecto invernadero

Fuente: Lelieveld et al. (1998)

Se puede explicar así la implicación directa de los GEI en el proceso global de cambio climático, ya que, tal y como se ha comentado anteriormente, estos gases son capaces de absorber las radiaciones de onda larga que proceden de la Tierra y se dirigen al espacio, produciéndose desequilibrios energéticos que llevan a un aumento global de las temperaturas.

1.2.2.1.1 Dióxido de carbono

El dióxido de carbono es el gas más importante desde el punto de vista del cambio climático (Crutzen y Lelieveld, 2001), siendo el segundo en importancia tras el vapor de agua en cuanto a impacto radiativo (Seinfeld y Pandis, 1998).

La concentración de CO_2 en la atmósfera ha aumentado desde 280 ppm en 1750 hasta 367 en 1999 y sigue aumentando en la actualidad (**Figura 9**). Los estudios realizados a largo plazo revelan que la concentración actual de CO_2 no ha sido superada en los últimos 420.000 años y probablemente tampoco en los últimos 20 millones de años. El ritmo de aumento desde 1980 es de un 0,4% anual, y este aumento está causado por el incremento de las emisiones, principalmente de origen humano.

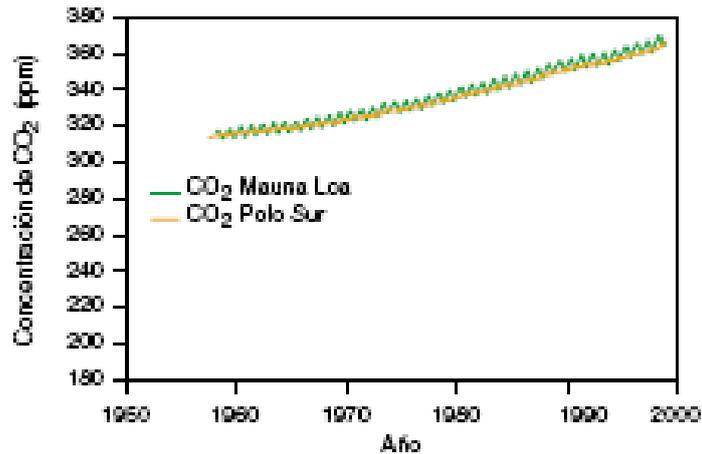


Figura 9. Evolución temporal de la concentración de CO₂ en la atmósfera

Fuente: IPCC (2001b)

Considerando estos datos, parece quedar demostrado que la Tierra se encuentra en una época con una tendencia al alza en cuanto a la concentración de CO₂ en la atmósfera, la cual está provocada por el incremento de las emisiones anuales.

Por otro lado, también es importante destacar que las variaciones climáticas en la Tierra que se han producido durante la historia se encuentra íntimamente ligadas con la variabilidad en la concentración de CO₂ en la atmósfera (Lelieveld *et al.*, 1998; Mackenzie, 1999; Crutzen y Lelieveld, 2001).

Así, las interferencias que se producen en el ciclo global del CO₂ en la atmósfera a causa de las emisiones antropogénicas, producen un desequilibrio que lleva a modificaciones importantes en la estabilidad climática (Mackenzie, 1999; IPCC, 2001a; Grace, 2004).

A pesar de todas estas consideraciones, las emisiones de CO₂ no se consideran en los Inventarios Nacionales de Emisiones en el apartado de Agricultura ya que resulta complicado situar al sector agrario en el marco de las emisiones de CO₂, considerando que se trata de una **fuentes** de emisión y de un **sumidero** al mismo tiempo (European Environment Agency, 2001), formando parte así, de un ciclo de carbono a corto plazo (Pattey *et al.*, 2005), además, la principal fuente de emisión de este gas es la quema de combustibles fósiles (Seinfeld y Pandis, 1998; Mackenzie, 1999; IPCC, 2001b; IPCC, 2001a; Grace, 2004), por lo que las emisiones de este gas procedentes de la Agricultura resultan insignificantes a nivel global.

1.2.2.1.2 Metano

El metano es el hidrocarburo más abundante en la atmósfera y uno de los gases orgánicos más abundantes (Minami, 1997). La producción de CH₄ en el mundo es de 535 Tg cada año, de las cuales 375 son de origen antropogénico y dentro de esta fuente, del orden de 100 Tg proceden directamente de la ganadería (Seinfeld y Pandis, 1998).

La concentración de metano en la atmósfera crece de forma continuada desde finales del siglo XVIII, aumentando desde 800 hasta aproximadamente 1.720 partes por billón en volumen (Kormann *et al.*, 2002) en la actualidad (Mackenzie, 1999).

La tasa de crecimiento ha sido observada en varios trabajos en la actualidad, principalmente como consecuencia del incremento en la preocupación social y científica por el proceso global del cambio climático, además de la mejora de las técnicas y equipos de medición. Así, durante la década de los 80 Blake y Rowland (1988) concluyeron que el incremento fue del 1% anual, mientras que Khalil y Rasmussen (1990) cuantificaron este aumento en 0,4 ppbv/año. Parece ser que esta tendencia se redujo ligeramente en la década de los 90 (IPCC, 2001b; Steele *et al.*, 1992), aunque el incremento en la concentración de metano atmosférico sigue siendo una realidad, llegando a un crecimiento anual del 0,4 % entre los años 1.990 y 1.999 (**Figura 10** y **Figura 11**).

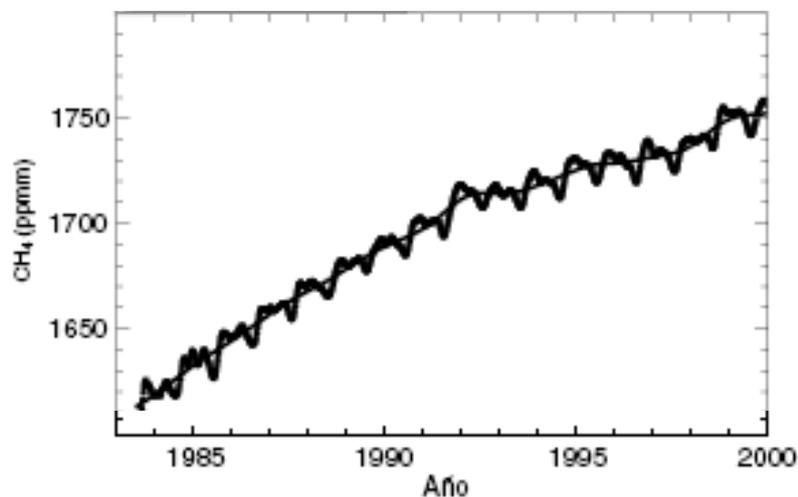


Figura 10. Evolución de la concentración de CH₄ en la atmósfera

Fuente: IPCC (2001b)

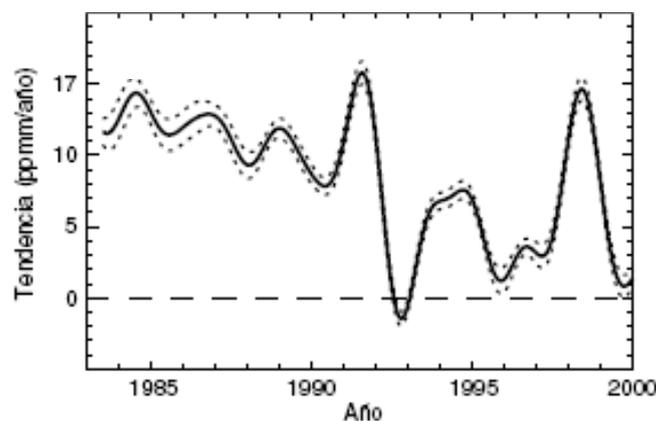


Figura 11. Tendencias en la evolución de la concentración de CH₄ en la atmósfera

Fuente: IPCC (2001b)

Este incremento de metano en los últimos tiempos ha sido altamente significativo, hasta el punto que la concentración actual de metano no se había superado en la Tierra desde hace 420.000 años (IPCC, 2001b).

Según los expertos de la Convención Marco para el Cambio Climático (UNFCCC, 2005) el metano es el segundo mayor contribuyente al calentamiento global tras el dióxido de carbono. Tal y como se comentó anteriormente su capacidad de absorber radiaciones de onda larga es del orden de 20 veces superior a la del CO₂, de ahí su importancia en el proceso global de cambio climático.

El metano absorbe y emite radiaciones a 3.310 y 7.660 nm de forma que su espectro coincide con el espectro de emisión de la Tierra (**Figura 5**, véase pág. 9), de ahí que participe en el proceso global de desequilibrio energético actuando de igual forma que el CO₂ y el vapor de agua (Houweling, 1999). En la **Figura 12** se presenta el espectro de absorción de radiación en la atmósfera, identificando los picos de absorción producidos por el metano.

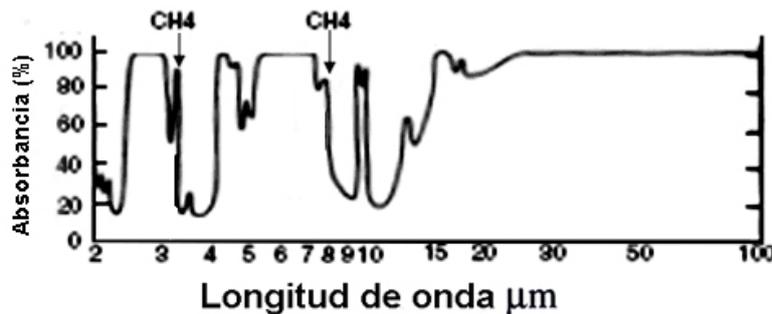


Figura 12. Espectro de absorción de radiación en la atmósfera

Fuente: Houweling (1999)

Además del efecto directo sobre el equilibrio energético en la Tierra (forzamiento radiativo), el metano, a causa de sus características químicas como gas reducido, tiene un efecto indirecto contribuyendo a la formación de otros GEI en la atmósfera como el O₃ a nivel de la troposfera y el vapor de agua en la estratosfera (Lelieveld y Crutzen, 1992; Lelieveld *et al.*, 1998). Así, se incrementa el efecto directo sobre el clima aproximadamente en un 30%. La mayor parte de este efecto indirecto se debe a la formación de O₃ troposférico, mientras que la formación de H₂O es responsable de aproximadamente un 5%. El metano de origen antropogénico es responsable directo del 25% del aumento de la concentración de O₃ que se produce en la troposfera (Lelieveld *et al.*, 1998).

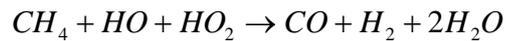
La formación de O₃ y H₂O se produce durante el proceso de oxidación del metano, siguiendo las **Ecuaciones 1** y **2** (Crutzen y Lelieveld, 2001):

En presencia de NO_x



Ecuación 1

En ausencia de NO_x



Ecuación 2

Por otro lado, considerando que el metano reacciona con el radical OH en la atmósfera, al aumentar la concentración de metano se reduce la concentración de OH^* , al ser este el principal sumidero para el metano atmosférico, el tiempo de residencia del CH_4 en la atmósfera aumenta, incrementándose así su capacidad de calentamiento global (Lelieveld y Crutzen, 1992).

1.2.2.1.3 Óxido nitroso

Respecto al óxido nitroso, hay que considerar también su importancia como gas responsable en el cambio climático, debido principalmente a su elevada capacidad de efecto invernadero y a su larga persistencia en la atmósfera.

Un tercio de las emisiones de óxido nitroso proceden directamente de actividades antropogénicas, siendo el resto de la producción de origen natural. También es importante considerar que la ganadería es responsable de aproximadamente el 10% de las emisiones a nivel global (IPCC, 2001), por lo que la emisión de este gas es una cuestión muy a tener en cuenta.

Por otro lado, del mismo modo que ocurre con el dióxido de carbono y el metano, la evolución en la concentración atmosférica del N_2O , ha aumentado de forma muy significativa durante los últimos años, alcanzándose niveles que no se superaban desde hace al menos 1.000 años (**Figura 13**).

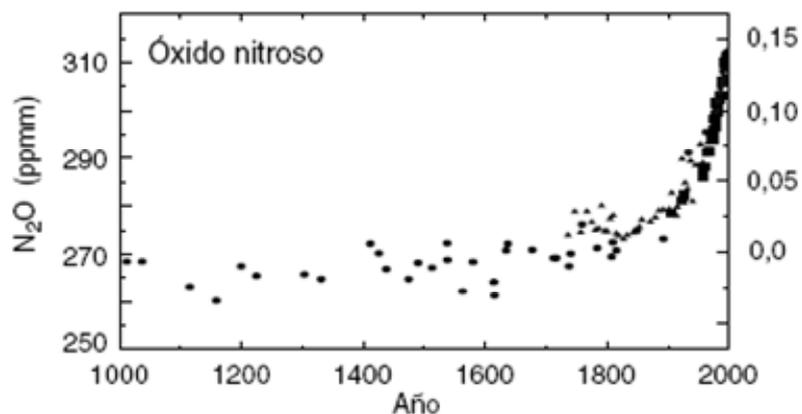


Figura 13. Tendencias en la evolución de la concentración de N_2O en la atmósfera

Fuente: IPCC (2001b)

1.2.2.2 El cambio climático

Se entiende por **cambio climático** un cambio de clima atribuido directa o indirectamente a la actividad humana que altera la composición de la atmósfera mundial y que se suma a la variabilidad natural del clima (UNFCCC, 1992; Seinfeld y Pandis, 1998).

Otra definición más reciente del **cambio climático**, es la que presenta el IPCC en su informe del año 2007: Se entiende por cambio climático todo cambio en el clima debido a las variaciones naturales o a la acción humana (IPCC, 2007)

El cambio climático es una realidad que se ha constatado durante el último siglo y se ha convertido en uno de los principales asuntos políticos y científicos (Schneider, 1989). El estudio de algunas variables del este sistema climático, como es el caso de la temperatura, las precipitaciones, la humedad de la atmósfera, el nivel del mar, los fenómenos climatológicos extremos, etc., ha constatado que la modificación en las tendencias climáticas es evidente (IPCC, 2001a):

- La temperatura media mundial en la superficie ha aumentado $0,6 \pm 0,2^{\circ}\text{C}$ desde finales del siglo XIX.
- Las precipitaciones anuales en la Tierra han seguido aumentando en las latitudes medias y altas del hemisferio norte, excepto en Asia oriental durante el último siglo.
- El ritmo de aumento del nivel medio del mar a nivel mundial durante el siglo XX fue de entre 1 y 2 mm al año.
- Según los datos de los satélites, es muy probable que haya habido reducciones de un 10% en la extensión de la capa de nieve sobre la tierra desde finales de los años sesenta.

En conjunto, esta serie de tendencias observadas llevan a concluir que se está produciendo un periodo de calentamiento global (IPCC, 2001b). Los posibles efectos de este proceso se han analizado, realizando predicciones sobre el comportamiento del clima en el futuro y las consecuencias que podrían conllevar.

Según estas estimaciones, la concentración de GEI en la atmósfera seguirá aumentando durante el siglo XXI, llegando a un punto en el que la degradación del medio ambiente mundial se producirá en formas que van más allá del calentamiento global, reduciendo de forma sensible la calidad del aire (IPCC, 2001b). Entre las previsiones realizadas para el siglo XXI por el IPCC (2001b), merece destacar las siguientes:

- Se proyecta que la temperatura media mundial aumentará entre $1,4$ y $5,8^{\circ}\text{C}$ en el periodo comprendido entre 1990 y 2100.
- Es muy probable que aumente el número de días calurosos y las olas de calor en casi toda la superficie terrestre, así como que disminuyan el número de días de heladas y las olas de frío.

- Se espera también una reducción del rango de variación de la temperatura diurna en la mayoría de zonas terrestres.
- Se proyecta que habrá un aumento de los promedios mundiales de vapor de agua, evaporación y precipitaciones.
- Es probable que se produzca un aumento de la desecación continental durante el verano, aumentando por tanto el riesgo de sequía.
- También es probable que, en algunas zonas, aumente la intensidad máxima de los vientos de los ciclones tropicales así como la intensidad máxima y media de las precipitaciones asociadas a los mismos.
- También continuará la recesión general de los glaciares y los casquetes polares durante el siglo XXI, disminuyendo la capa de nieve y el hielo marino del hemisferio norte.
- Existe además riesgo de que se produzcan efectos difíciles de predecir como sinergias entre varios factores, retroalimentación del forzamiento radiativo, etc.

En un informe posterior del mismo organismo de las Naciones Unidas (IPCC, 2007), se endurecieron las predicciones acerca de las consecuencias del cambio climático, añadiendo a las ya propuestas anteriormente previsiones como:

- Reducción de hasta un 30% en la disponibilidad de agua
- Mayor frecuencia de fenómenos meteorológicos extremos
- Riesgo de extinción para un 20-30% de las especies actuales
- Inundaciones importantes en las zonas costeras
- Etc.

Considerando todas estas predicciones, parece necesario tomar medidas al respecto para tratar de mitigar este proceso abierto. Acuerdos como el *Convenio de Ginebra sobre contaminación atmosférica transfronteriza* (1979), la *Convención Marco de las Naciones Unidas para el Cambio Climático* (1992) o el *Protocolo de Kyoto* (UNFCCC, 1997) recogen los compromisos de determinados países en este respecto que se materializan en los Inventarios Nacionales de Gases de Efecto Invernadero de IPCC y compromisos de reducción de emisiones. Siguiendo los mismos principios de estos acuerdos se han desarrollado exigentes legislaciones en materia ambiental a nivel Europeo principalmente:

- Directiva 1996/61/CE prevención y control integrados de la contaminación.
- Directiva 1996/62/CE sobre evaluación y gestión de la calidad del aire.

- Directiva 2001/81/CE sobre techos nacionales de emisión.
- Directiva 2001/481/CE en la que se constituye el registro de emisiones y fuentes contaminantes (EPER).
- Directiva 2003/87/EC sobre comercio de emisiones.

Así, parece claro que el proceso existe, y que va a seguir evolucionando con unas consecuencias realmente preocupantes. El problema radica en la identificación de la responsabilidad de este fenómeno. En el informe del IPCC del año 2007, se considera que el cambio climático puede deberse únicamente a causas naturales, mientras que en informes anteriores la responsabilidad del proceso se le atribuía al hombre de forma inequívoca. De esta forma, el problema de la responsabilidad del proceso, que implica la capacidad de reversión del mismo de forma implícita, parece no quedar aclarado, a pesar de que los indicios hacen sospechar que, si bien es posible que nos encontremos ante una variación natural del clima, si parece que ésta se encuentre acelerada por la acción del hombre.

1.3 CONSIDERACIONES PREVIAS ACERCA DE LA MEDICIÓN DE LAS EMISIONES

A modo de introducción, y con el fin de conseguir una mejor comprensión de los procesos y técnicas empleados en el presente trabajo para ello se ha realizado una revisión bibliográfica al respecto. De esta forma, en los siguientes epígrafes se describirán ciertos aspectos relacionados con las unidades de medida utilizadas, los sistemas de medida de emisiones de gases, las cámaras estáticas y dinámicas destinadas a medir las emisiones, los balances de dióxido de carbono como base de cálculo de la ventilación en granjas y, finalmente, los procesos de producción de dióxido de carbono en los conejos.

1.3.1 Unidades de medida

Para expresar bajas concentraciones de gases, se pueden utilizar diferentes unidades de medida. Lo más frecuente es emplear la relación en volumen o en masa:

- **Proporción volumétrica:** se utiliza muchas veces la unidad de **partes por millón (ppm)**, cuyo significado es la proporción volumétrica del gas (**Ecuación 3**):

$$\text{Concentración} \left[\text{ppm} = \frac{\text{cm}^3}{\text{m}^3} \right] = \frac{C_i \left[\frac{\text{moles}}{\text{m}^3} \right]}{C \left[\frac{\text{moles}}{\text{m}^3} \right]} \cdot 10^6 \left[\frac{\text{cm}^3}{\text{m}^3} \right]$$

Ecuación 3

En esta ecuación C_i y C son moles por unidad de volumen de la especie gaseosa "i" y el aire, respectivamente, medidos a una presión P (Pa) y una temperatura T (K). La multiplicación por 10^6 se debe al cambio de unidades. En las ecuaciones se reflejan las unidades para facilitar el seguimiento.

La expresión ppm no es realmente una concentración, sino una fracción volumétrica adimensional. Sin embargo, se utiliza muy frecuentemente y además muchos instrumentos de medida funcionan de forma que físicamente miden esta proporción.

Por otro lado, la relación entre ppm y $\mu\text{g}/\text{m}^3$ se puede calcular siguiendo la (**Ecuación 4**):

$$\text{Conc}[\text{ppm}] = \frac{P_i}{P} \cdot 10^6 = \frac{m_i \left[\frac{\mu\text{g}}{\text{m}^3} \right] \cdot R \left[\frac{\text{N} \cdot \text{m}}{\text{mol} \cdot \text{K}} \right] \cdot T[\text{K}]}{Mr \left[\frac{\text{g}}{\text{mol}} \right] \cdot P \left[\frac{\text{N}}{\text{m}^2} \right] \cdot 10^6 \left[\frac{\mu\text{g}}{\text{g}} \right]} \cdot 10^6 = \frac{R \cdot T}{P \cdot Mr} \cdot m_i \left[\frac{\mu\text{g}}{\text{m}^3} \right]$$

Ecuación 4

Como ejemplo, para el caso del CO_2 cuya masa molecular relativa (Mr) es 44, la equivalencia, a presión atmosférica y 298°K , sería:

| Gas | $\mu\text{g}/\text{m}^3$ | ppm | ppm | mg/m^3 |
|---------------|--------------------------|----------|-----|------------------------|
| CO_2 | 1 | 0,000556 | 1 | 1,7990 |

De esta forma, la ecuación para el **cálculo de las emisiones** puede calcularse de la siguiente forma (**Ecuación 5**):

$$\text{Emis} \left[\frac{\mu\text{g}}{\text{h}} \right] = (C_{\text{int}} - C_{\text{ext}}) \left[\frac{\mu\text{g}}{\text{m}^3} \right] \cdot Q \left[\frac{\text{m}^3}{\text{h}} \right] = \frac{(C_{\text{int}} - C_{\text{ext}}) [\text{ppm}] \cdot P \cdot Mr \cdot Q}{R \cdot T}$$

Ecuación 5

Esta ecuación es la que da el valor de las emisiones, y a partir de ella se pueden hacer las modificaciones de unidades que se consideren necesarias.

1.3.2 Medición de las emisiones

La medición de las emisiones de gases por parte de una fuente emisora es una actividad compleja que puede realizarse de diferentes formas, en función de los recursos disponibles y de los resultados que se quieran obtener.

Esta medición da como resultado un valor de emisión para esa actividad concreta, y en las condiciones particulares en que esa actividad se desarrolló. El objetivo final, sin embargo, es obtener unos valores de emisiones característicos de cada actividad. Es decir, que a partir de unas mediciones es necesario realizar correctamente la extrapolación hasta conseguir ratios de emisión y/o factores de emisión de la actividad.

En granjas, los ratios y factores de emisión deben ser característicos para cada especie animal, para cada subgrupo de animales, en cada sistema de alojamiento habitualmente

utilizado, y con cada sistema de gestión de estiércol. Esta distinción se debe a que todos esos factores influyen en el valor de las emisiones.

1.3.2.1 Ratios de emisión y Factores de emisión

Es necesario distinguir claramente entre ratios de emisión y factores de emisión (Lacey *et al.*, 2003).

Un **ratio de emisión** es la expresión de masa emitida por unidad de tiempo, normalmente expresada en términos de unidad de producción. El valor puede expresarse con unidades diversas:

- g de cada gas emitidos por hora (para una granja).
- mg de cada gas por hora y animal (en unas condiciones determinadas).
- Kg de cada gas por día y unidad ganadera (aproximadamente 500 kg de peso vivo), si se pretende comparar diferentes edades de los animales.
- Etc.

Un **factor de emisión** es la masa de contaminante emitida por unidad de producción (aunque muchas veces también se hace referencia al tiempo). Un factor de emisión debe ser “un valor representativo que trata de reflejar la cantidad de un determinado contaminante que es emitido a la atmósfera con cada actividad asociada a la emisión de ese contaminante” (EPA, 1995). Los factores de emisión pueden expresarse con diferentes unidades:

- g de gas por animal producido.
- Kg de gas por plaza y año (contando los vacíos sanitarios).
- g de gas por kilo de carne producida.
- Kg de gas emitido por tonelada de estiércol tratado.
- Kg de gas emitido por metro cuadrado de granja, al año.
- Etc.

Por lo tanto, el ratio de emisión es la cantidad de cada gas emitida por la granja en un momento dado, mientras que un factor de emisión es un valor que engloba las emisiones de todo un ciclo, incluyendo el vacío sanitario, y es de gran utilidad para la elaboración de inventarios de emisión. Su elaboración debe ser más cuidadosa, porque deben representar de la forma más ajustada posible la realidad de emisiones de la actividad a que se refieren. Para ello es necesario tomar en cuenta unas consideraciones, tal y como se recoge por la Agencia de Protección del Medio Ambiente de los Estados Unidos (EPA, 1997).

En general, el factor de emisión de un gas procedente de los alojamientos, en una especie animal se puede obtener a partir de los ratios de emisión promediados a lo largo del ciclo de producción, y teniendo en cuenta el vacío sanitario como período de tiempo necesario para desarrollar la actividad en la que no existen emisiones.

1.3.2.2 Métodos experimentales para determinar las emisiones

La medición experimental de las emisiones, se fundamenta en la aplicación de diversos métodos para determinar el flujo de gas intercambiado.

La determinación de cualquier gas emitido a partir de una fuente emisora se realiza habitualmente mediante balances de materia en los cuales se evalúa la variación de la concentración de dicho gas en el aire, antes y después de estar en contacto con la fuente emisora. Los principales métodos de determinación de las emisiones son los siguientes (Greatorex, 2000).

1.3.2.2.1 *Cámara estática*

Descripción: se trata de una cámara que cubre un área pequeña de material emisor (generalmente inferior a 1 m²) en la que se evalúa el incremento en la concentración del gas emitido. La duración del experimento suele ser de 1 hora o menos, y en ese período de tiempo deben tomarse muestras mediante procedimientos diversos, evitando las fugas de gas del interior. El ratio de emisión puede calcularse a partir de la variación inicial de la concentración en el interior de la cámara, tal y como se muestra en la **Figura 14**.

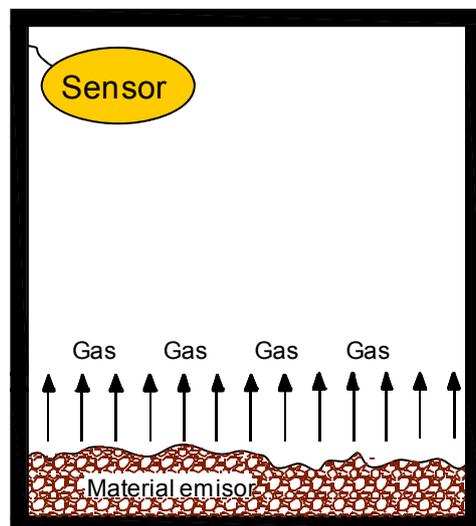


Figura 14. Esquema de la construcción de una cámara estática

Fuente: Elaboración propia

Ventajas y utilidad: se trata de un sistema bien definido, aceptado, económico y fácil de construir y utilizar, siempre que se disponga de métodos adecuados y automatizados para medir la concentración de gas. Es un sistema apto para estudiar procesos de emisión y diseños

factoriales comparando diferentes sustancias emisoras. Resulta apto para estudiar las emisiones procedentes de fuentes puntuales, o en caso de emisiones procedentes de una superficie.

Inconvenientes y limitaciones: El aislamiento de un espacio altera las condiciones climáticas habituales: temperatura, humedad y velocidad del viento. Las condiciones ambientales son en muchos casos factores determinantes de las emisiones. Además, mediante este sistema no se pueden estudiar las emisiones como un proceso dinámico, sino únicamente estático. Por otra parte, este método no es aplicable a ciertos casos, como emisiones en alojamientos ganaderos, o emisiones de cultivos de mayor tamaño. Finalmente, el sistema tiene una gran limitación espacial porque suele estudiar un área pequeña. Esto se puede solucionar con el estudio de un área mayor o con más repeticiones.

1.3.2.2.2 Cámara dinámica

Descripción: La cámara dinámica (o cámara abierta) permite considerar los procesos de difusión y de transporte de los gases. Para ello dispone de una vía de entrada de gas y otra de salida, y la emisión se estima considerando las concentraciones de entrada y de salida, además del flujo de aire intercambiado, según se observa en la **Figura 15**

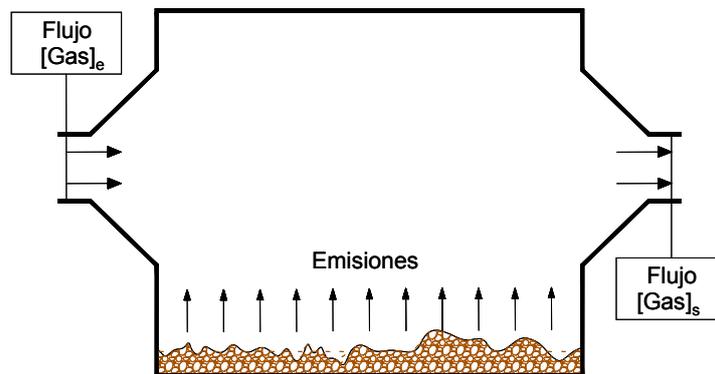


Figura 15. Esquema constructivo de una cámara dinámica

Fuente: Elaboración propia

Ventajas y utilidad: Las aplicaciones son muy similares a las de las cámaras estáticas, con la ventaja de que se obtiene información de mejor calidad al tener en cuenta el transporte convectivo y evitar la interferencia ambiental.

Inconvenientes y limitaciones: es necesario que se produzca una buena mezcla de los gases en la cámara para evitar mediciones sesgadas de las emisiones. También cuenta con algunas desventajas de las cámaras estáticas: variabilidad espacial, problemas en algunas aplicaciones, estudio de procesos dinámicos, etc. Finalmente, el sistema de medición de las concentraciones debe ser muy preciso para diferenciar concentraciones de entrada y de salida, y la medición del flujo de aire debe ser lo más exacta posible.

1.3.2.2.3 Técnicas micrometeorológicas

Descripción: Las técnicas micro meteorológicas miden el transporte turbulento de gases desde la superficie del suelo a la atmósfera. Se basan en la medición continua de las componentes de velocidad del viento, de forma simultánea con las concentraciones de amoniaco en diferentes puntos, sin alterar las características ambientales del entorno medido. Existen varios tipos de técnicas micro meteorológicas, según su forma de calcular las emisiones y el área óptima que pueden cubrir:

- Balance de flujo horizontal, para áreas pequeñas (**Figura 16**).
- Correlación *eddy*.
- Estudio de gradientes de concentración.
- Modelos de dispersión estocásticos.

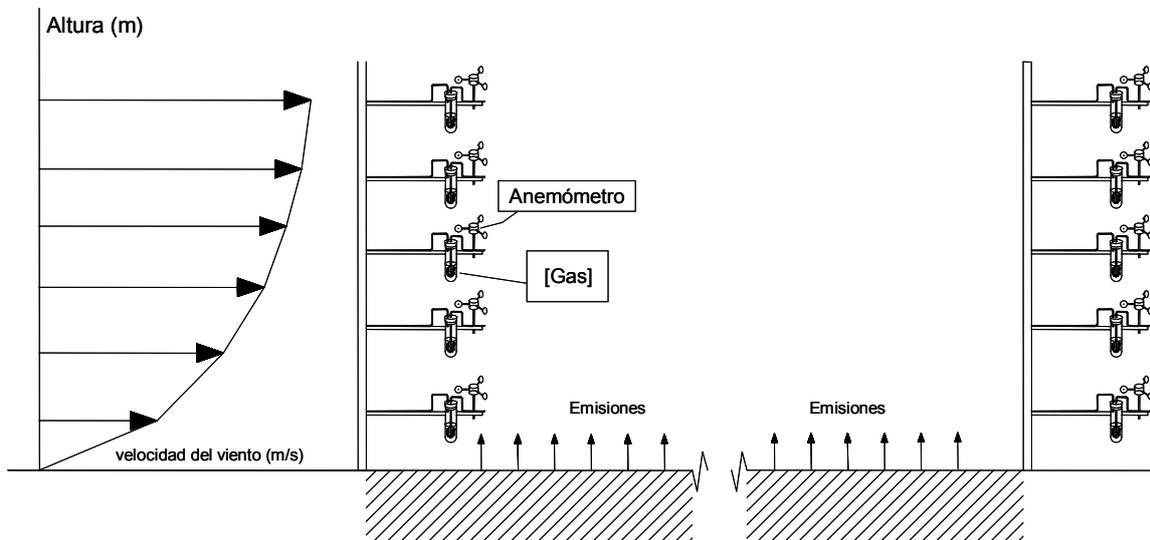


Figura 16. Técnica micrometeorológica de balance de flujo transversal.

Fuente: Elaboración propia

Ventajas y utilidad: Las técnicas micro meteorológicas permiten la medición de las emisiones de grandes áreas (hasta 1 km²), sin interferencias con las condiciones ambientales y con la ventaja de ser muy versátil y adaptable a diferentes aplicaciones.

Inconvenientes y limitaciones: se trata de un sistema que requiere mediciones frecuentes y precisas en diferentes puntos, lo cual supone un gran despliegue material de elevado coste y uso complicado. El método requiere que la superficie del terreno sea homogénea.

1.3.2.2.4 Gases trazadores

Descripción: Este sistema es aplicado a las emisiones en espacios cerrados, y se basa en la medición simultánea de la concentración de dos gases a la salida del espacio de control:

uno es el gas que se quiere estudiar, y otro es un gas inerte usado como trazador, que es liberado a una cierta dosis. Habitualmente se utiliza el hexafluoruro de azufre (SF₆). El gas trazador empleado debe ser químicamente estable, ausente en el aire ambiente, no peligroso para la salud, no inflamable ni explosivo a las concentraciones utilizadas y debe ser fácil de medir con precisión. Las emisiones pueden obtenerse despejando Q_{GAS} de la **Ecuación 6**

$$\frac{Q_{GAS}}{Q_T} = \frac{C_{GAS}}{C_T}$$

Ecuación 6

Siendo:

- Q_{GAS}:** flujo de gas que se quiere determinar
- Q_T:** flujo de gas trazador liberado (valor conocido).
- C_{GAS}:** concentración de salida del gas que se está estudiando (medido)
- C_T:** concentración de salida del gas trazador (medido)

Ventajas y aplicaciones: Es un método particularmente adecuado en situaciones en las que resulta difícil medir el flujo de ventilación: medición del metano producido por fermentación entérica en los rumiantes; medición de emisiones por fuentes superficiales; determinación de emisiones producidas en granjas con ventilación natural, etc.

Inconvenientes y limitaciones: Es un método bastante complejo, y que puede no dar resultados satisfactorios si no existe buena mezcla de gases.

1.3.2.3 Determinación de la concentración de los gases

Existen varios métodos para determinar las concentraciones de los gases. Estos métodos se basan en diferentes propiedades de los éstos, y su aplicación dependerá de la precisión que se necesite, la frecuencia y número de mediciones, así como el rango de concentraciones en el que se quiera medir. Los sistemas de medición de gases se pueden clasificar según los siguientes criterios:

- **Rango de medición:** se trata de una característica muy importante, porque determina la aplicabilidad del sistema de medida. También es muy importante la precisión en la medida.
- **Coste:** Es un componente que, de forma paralela a lo estrictamente experimental, determina en muchos casos el desarrollo del experimento.
- **Periodicidad de las medidas:** hay sistemas que miden una concentración media durante un período de tiempo (desde varias horas hasta varias semanas), mientras que hay otros que ofrecen medidas casi en continuo (frecuencia de medición del orden de segundos). Este parámetro determina qué sistemas de medición se pueden usar para cada experimento.

- **Vida del sensor:** La vida útil del elemento sensor es una característica fundamental a tener en cuenta. Hay sistemas que sólo permiten una medida, mientras que otros permiten multitud de mediciones.
- **Portabilidad:** Los equipos de medida transportables son más versátiles que los fijos.

1.3.2.3.1 *Cromatografía de gases (GC)*

El instrumento más utilizado para medir las concentraciones de gases es la cromatografía de gases. Esta metodología se basa en las diferencias existentes en la deposición de los gases sobre una fase sólida estacionaria, cuando la atraviesan transportados a través de una fase móvil líquida (normalmente un gas inerte como el helio). Así, los componentes de cualquier mezcla gaseosa se separan de forma individual, donde cada componente es identificado por un detector en función del tiempo de retención en la fase sólida. El tipo de detector utilizado es uno de los puntos clave en este sistema. Para la medición de GEI se suelen utilizar tres tipos de detectores:

- Detectores de conductividad térmica (TCD). Generalmente utilizados para CO₂, aunque también se usa para CH₄ en algunos casos
- Detectores de ionización de llama (FID).
- Detectores de captura de electrones (ECD). Normalmente se utiliza para detectar el N₂O

Estas técnicas han sido empleadas para realizar estimaciones sobre las emisiones de gases en granja, y en estiércol, por varios autores. El detector utilizado suele ser el FID (Gonzalez-Avalos y Ruiz-Suarez, 2001; Clemens *et al.*, 2006; Chadwick, 2005; Yamulki, 2006; Pattey *et al.*, 2005).

1.3.2.3.2 *Espectroscopía infrarroja no dispersiva (NDIR)*

Constituye una serie de técnicas cuyo fundamento es la medición de la radiación infrarroja de una determinada longitud de onda absorbida por el gas estudiado. Están compuestos por una lámpara de infrarrojos (fuente), un filtro de longitudes de onda y un receptor de infrarrojos (**Figura 17**). En este sistema, la concentración del gas se mide por la absorción que se produce a una determinada longitud de onda en el detector de infrarrojos.

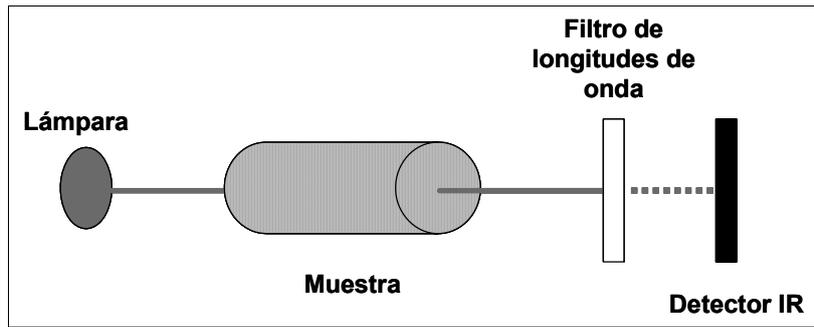


Figura 17. Esquema constructivo de un equipo NDIR

Fuente: Elaboración propia

Los equipos básicos de espectrometría no han sido normalmente muy utilizados tradicionalmente para medir gases en granja, pero actualmente parece que la versatilidad de estos sistemas han hecho aumentar su utilización. Así, Haeussermann *et al* (2006) lo utilizaron para cuantificar las emisiones de CH₄ procedentes de purín de cerdo, Pattey (2005) para cuantificar las emisiones de CO₂ durante el compostaje de estiércol bovino, Gates *et al.*(2006) y Wheeler *et al.* (2006) lo emplearon para determinar la concentración de CO₂ en granjas de pollos. Hay que tener en cuenta que este tipo de equipos son muy sensibles a la presencia de polvo, por lo que es necesario extremar las precauciones en este sentido cuando se utiliza en granjas.

1.3.2.3.3 *Espectroscopía de absorción infrarroja por medio de la transformación de Fourier (FTIR)*

Consiste en la medición de la absorción de radiación infrarroja por parte de una muestra gaseosa, mediante un instrumento llamado interferómetro (Smith, 1996). Este instrumento consiste de un espejo móvil, otro fijo y un divisor de luz (**Figura 18**) de forma que se obtiene como información un interferograma, o absorción relativa según el movimiento del espejo móvil. A partir 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. La técnica es comúnmente conocida por su acrónimo FTIR.

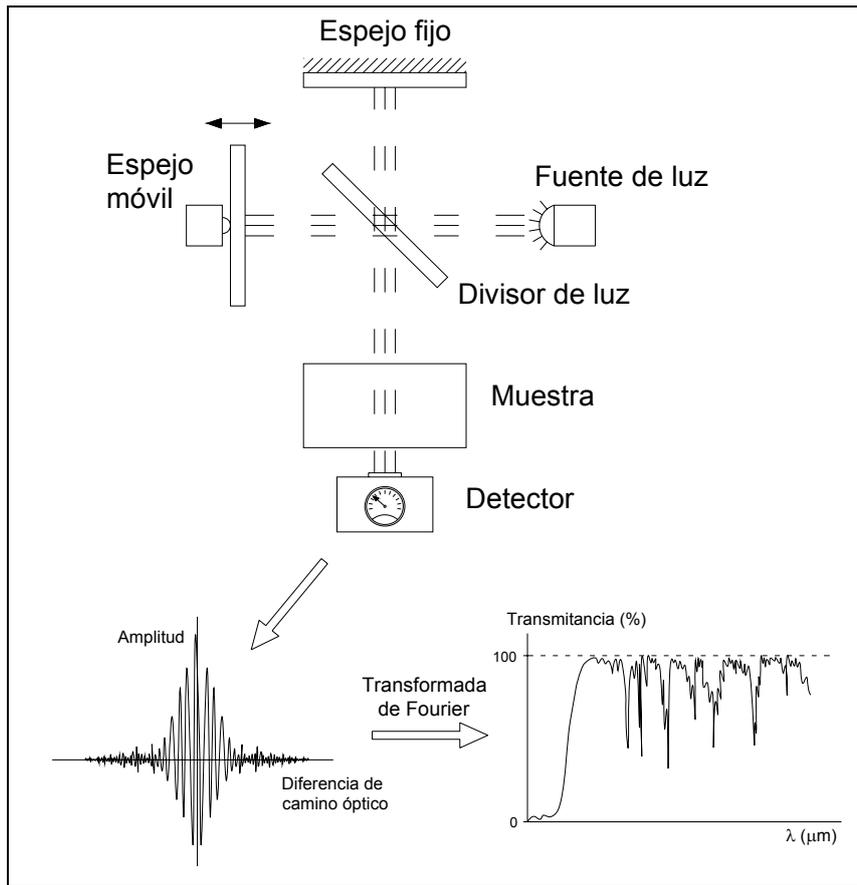


Figura 18. Esquema constructivo de un equipo FTIR y procesamiento de datos

Fuente: Adaptado de Smith (1996).

El interferograma contiene mucha información que la transformada de Fourier es capaz de estructurar para ofrecerla de una forma mucho más útil, como es el espectro de absorción. La comparación de este espectro con patrones de absorción de diferentes moléculas ofrece una estimación muy acertada de la composición de la muestra estudiada.

La sensibilidad del equipo puede variar según la longitud que recorre el haz infrarrojo. Así, para medir concentraciones de fondo en espacios abiertos se ha utilizado una variante llamada *espectroscopía FTIR de campo abierto* (open path FTIR) que consiste en proyectar el haz infrarrojo en un recorrido más largo (varias decenas de metros).

Este sistema ofrece las ventajas de ser muy sensible y preciso, funcionar en continuo y permitir la medida simultánea de muchos gases diferentes. Sin embargo, es un sistema caro, costoso en calibración, requiere personal especializado y no es fácilmente transportable por una persona.

A pesar de sus inconvenientes, la espectroscopia FTIR ha sido empleada para el estudio de gases (como el CH₄, CO₂, N₂O, CO y H₂O) en granjas de cerdos (Fukumoto *et al.*, 2003; Hellebrand y Kalk, 2001) y vacas (Amon *et al.*, 2001; Hellebrand y Kalk, 2001; Amon *et al.*,

2006). La espectroscopía FTIR de campo abierto ha sido utilizada para estudiar emisiones de tratamiento de estiércoles y su aplicación en campo (Childers *et al.*, 2001; Todd *et al.*, 2001).

1.3.2.3.4 Espectroscopía fotoacústica (PAS)

Consiste en la aplicar luz infrarroja intermitente de determinadas longitudes de onda preseleccionadas en función de los gases a medir. Cada tipo de molécula absorbe específicamente ciertas longitudes de onda, y esa absorción se transforma en un incremento de temperatura. Dado que la medición se realiza en una cámara cerrada, el incremento de temperatura va acompañado de un incremento de presión que es captado gracias a una membrana que emite una señal acústica (Mcqueen, 1979). El esquema constructivo básico se muestra en la **Figura 19**.

El sistema ofrece grandes ventajas, como la medición simultánea y precisa, y casi en continuo (medidas cada 30 – 100 segundos) de diversos gases. Por otra parte, requiere menos mantenimiento y calibración que los otros sistemas de medida complejos. Por ello ha sido empleado con éxito en granjas de aves (Miles *et al.*, 2006), cerdos (Nicks *et al.*, 2003; Moller *et al.*, 2004), vacas (Snell *et al.*, 2003; Moller *et al.*, 2004). Sin embargo es muy sensible al vapor de agua y el polvo, de forma que se requiere un sistema previo de limpieza.

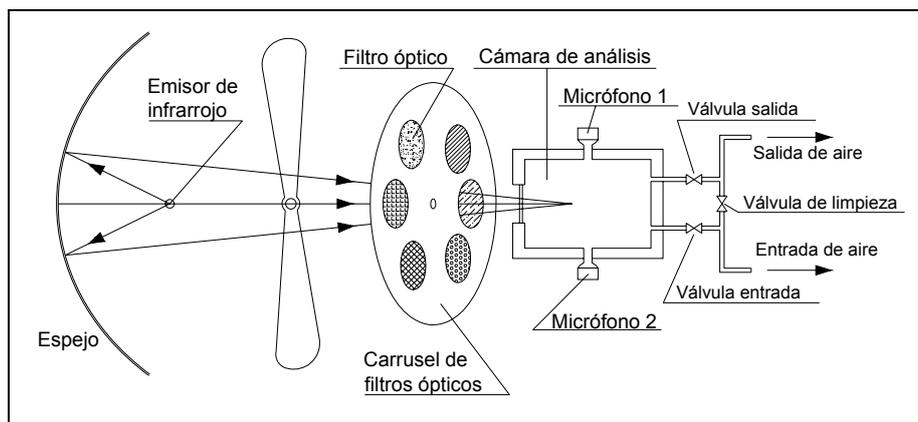


Figura 19. Esquema de un detector de gases fotoacústico

Fuente: Adaptado de Ni *et al.* (2001).

1.3.2.3.5 Espectroscopía de láser de diodo armónico (TDL)

La determinación de concentración de un gas a través de esta técnica, se basa en la absorción de un rayo láser infrarrojo que atraviesa la muestra en la que se encuentra el gas. Como en cualquier método de espectroscopia de absorción, la absorción de luz viene determinada por la cantidad de moléculas presentes de la sustancia a analizar. La sensibilidad de esta técnica depende del camino, la longitud y la intensidad de la línea de absorción, presentándose las mayores sensibilidades cuando la absorción de energía por parte de los gases ocurre en la región espectral cercana a la zona de emisión del láser. Algunos de los

gases presentes en la atmósfera, que se han medido a través de esta técnica son el CO, CO₂, N₂O, NO, NO₂, NH₃ y CH₄.

Debido a la rapidez y sensibilidad de los análisis, esta técnica es ideal para la medición *in situ* de bajas concentraciones de gases cuando se utilizan técnicas micro meteorológicas. El límite de detección es muy bajo (algunas ppt) para tiempos de funcionamiento de entre 5 y 30 minutos. En cuanto a las limitaciones de esta técnica, además de ser la más costosa económicamente de todas las relacionadas anteriormente, es importante conocer la limitación para medir más de un gas simultáneamente con el mismo diodo.

Esta técnica se ha utilizado con éxito en muchos trabajos para la cuantificación de gases procedentes de diversas fuentes. En producción ganadera, es una técnica poco utilizado, aunque ya hay algunos trabajos recientes relacionados con las emisiones procedentes de estiércoles de porcino (Park *et al.*, 2006; Wagner-Riddle *et al.*, 2006).

1.3.2.3.6 Tubos de detección

Los tubos de detección se basan en la absorción de gases (principalmente amoníaco) en superficies sólidas, acompañadas de una reacción de cambio de color. El contacto del aire con la superficie puede ser pasivo (difusión de amoníaco) o activo (flujo de aire forzado).

Su sensibilidad es variable, aunque alcanzan el rango de concentraciones habitual en alojamientos ganaderos. Sin embargo, no son útiles para las medidas de concentraciones exteriores. Su tiempo de respuesta es en general lento.

Sus principales ventajas son su sencillez y bajo coste, y por ello se han empleado bastante en granjas avícolas (Budavari, 2001; Lacey *et al.*, 2003; Redwine *et al.*, 2002) y de porcino (Jensen, 2002; Sheridan *et al.*, 2002). Sin embargo, los tubos sólo son utilizables una vez, y además su repetibilidad y reproducibilidad son desfavorables, sobre todo cuando se miden valores próximos al umbral de detección.

1.3.2.3.7 Difusores pasivos

Uno de los métodos más utilizados para la medida del amoníaco son los difusores pasivos. Su mecanismo de acción consiste en la absorción del amoníaco en una matriz sólida de carácter ácido, basándose en el transporte por difusión del amoníaco (Roadman *et al.*, 2003). El elemento medidor debe dejarse un tiempo en una ubicación concreta (típicamente una ó dos semanas), y posteriormente se analiza la cantidad de amoníaco absorbida. El valor resultante se corresponderá con una determinada concentración media de amoníaco durante la exposición. Los componentes básicos de este sistema de medida se recogen en la **Figura 20**. Existen diversas adaptaciones de este sistema de medición (Thijsse *et al.*, 1998; Perrino y Catrambone, 2004; Scholtens *et al.*, 2003a; Scholtens *et al.*, 2003b).

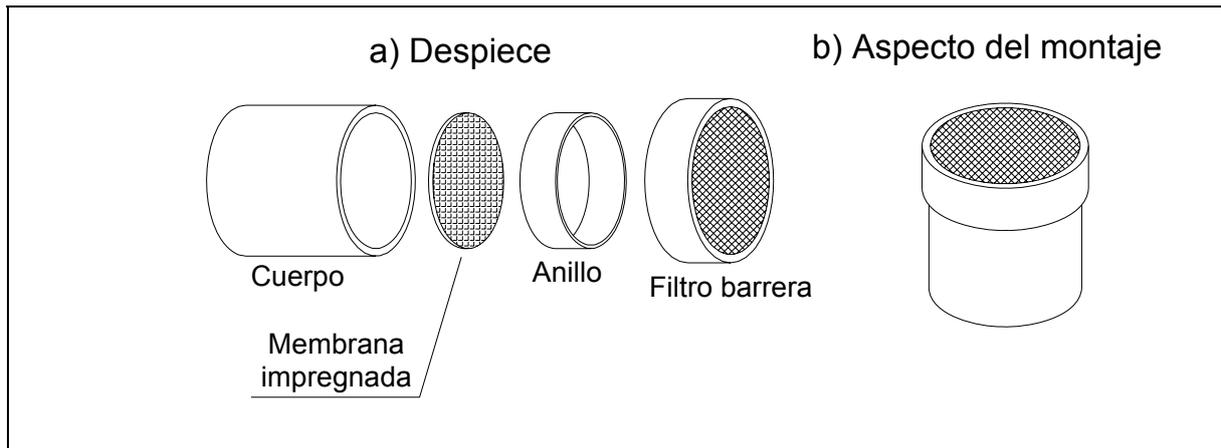


Figura 20. Esquema constructivo y aspecto externo del difusor pasivo

Fuente: Elaboración propia

Su sensibilidad es generalmente muy buena, pero deben estar muy bien calibrados para ofrecer resultados reproducibles.

Su mayor ventaja es su bajo coste y buenos resultados en mediciones del interior y exterior de granjas avícolas (Misselbrook *et al.*, 2005b; Rodhe y Karlsson, 2002; Siefert *et al.*, 2004; Zhu *et al.*, 2000), granjas de porcino (Hansen *et al.*, 2003; Huijsmans *et al.*, 2003; Malgeryd, 1998; Misselbrook *et al.*, 2004; Sherlock *et al.*, 2002; Sommer y Olesen, 2000; Sommer *et al.*, 2004a; Wulf *et al.*, 2002; Zhu *et al.*, 2000), granjas de vacas (Ellis *et al.*, 2001; Jepperson, 1999; Malgeryd, 1998; Mattila, 1998; McGinn *et al.*, 2003; Misselbrook *et al.*, 2002; Misselbrook *et al.*, 2005b; Morken y Sakshaug, 1998; Rodhe y Rammer, 2002; Sommer y Dahl, 1999). También se ha utilizado con éxito para estudiar otras fuentes de origen agrícola (Fowler *et al.*, 1998b; Hansen *et al.*, 1998; Larsson *et al.*, 1998; Moseley *et al.*, 1998; Mosquera *et al.*, 2000; Schjoerring y Mattsson, 2001). Sin embargo, no son útiles para estudiar variaciones de concentración en cortos períodos de tiempo, puesto que sólo ofrecen concentraciones medias y puntuales.

1.3.2.3.8 Captura ácida/básica

Es un método que consiste en hacer circular un flujo de aire conocido (generalmente pequeño) a través de un ácido o base débiles, de manera que el gas queda atrapado en el sustrato (véase la **Figura 21**). Posteriormente se analiza la cantidad de gas por procedimientos químicos aceptados (colorimetría de Nessler, colometría por indofenol, fotometría, valoración, conductimetría, etc).

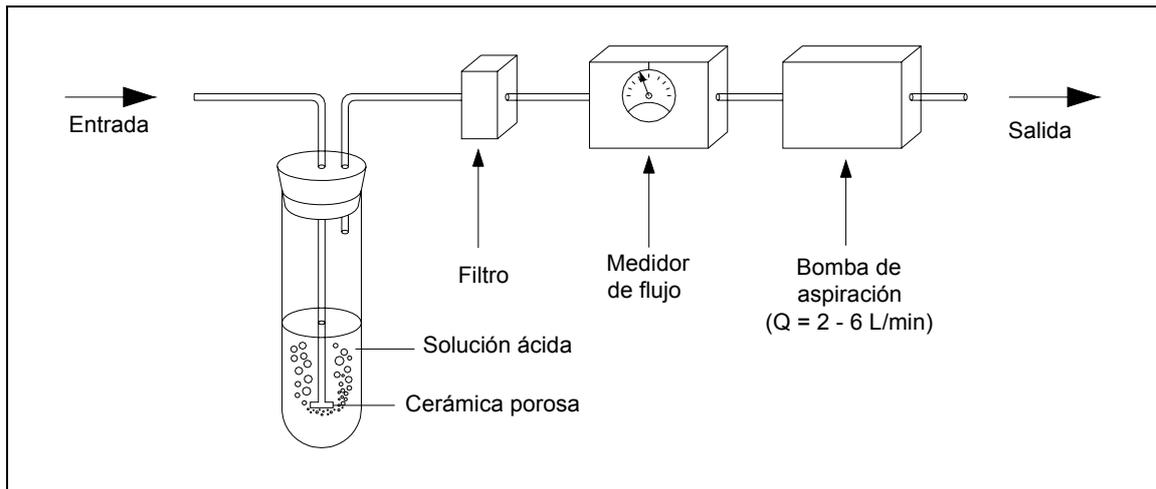


Figura 21. Componentes y esquema constructivo de un sistema de captura ácida

Fuente: Elaboración propia

La ventaja de este método es que puede llegar a ser muy sensible, haciendo variar el tiempo de registro y flujo de aire empleados. Por ello ha sido empleado con éxito en interior y exterior de granjas de aves (Guiziou y Béline, 2005; Jiang y Sands, 2000; Misselbrook *et al.*, 2005a; Misselbrook *et al.*, 2005b; Moore *et al.*, 1995), de porcino (Canh *et al.*, 1998b; Misselbrook *et al.*, 1998a; Misselbrook y Hansen, 2001; Portejoie *et al.*, 2003; Reeves *et al.*, 2002; Sommer y Jacobsen, 1999; Zahn *et al.*, 2001), de vacuno (Misselbrook *et al.*, 1998b; Misselbrook *et al.*, 2001; Petersen *et al.*, 1998; Thompson y Meisinger, 2002; Webb *et al.*, 2004). También se ha utilizado con éxito para estudiar fuentes de origen agrícola (Burkhardt *et al.*, 1998; Fowler *et al.*, 1998a; Horvath y Sutton, 1998; Hovmand *et al.*, 1998; Lee *et al.*, 1998; Neftel *et al.*, 1998). Sin embargo, al igual que la difusión pasiva, sólo aporta el valor medio de concentración durante el tiempo de muestreo, y conlleva mayores exigencias de material y análisis posterior.

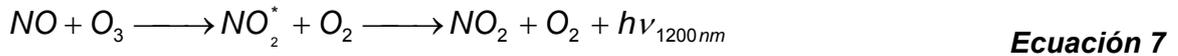
1.3.2.3.9 Sensor electroquímico

Estos sensores basan su funcionamiento en la cuantificación de los electrones intercambiados (corriente eléctrica) en una reacción red-ox en la que interviene el gas problema (Ni *et al.*, 2001).

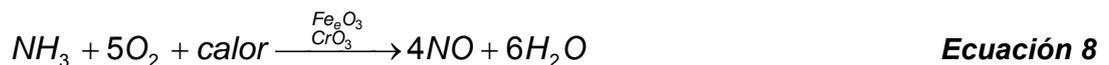
Se trata de un sistema con grandes ventajas por su medición en continuo y relativo bajo coste por medida utilizada. Sin embargo, la vida del sensor es limitada, requiriendo calibración cada un mínimo de 6 meses. En granjas es aplicable a mediciones en el interior de los alojamientos (Liang *et al.*, 2003; Wheeler *et al.*, 2000; Wilhelm *et al.*, 2001). Wheeler *et al.* (2000) determinó que la medición con sensores electroquímicos constituye una alternativa recomendable para la medición de amoníaco en granjas de pollos. Sin embargo, se ha constatado que este sistema pierde sensibilidad con mediciones prolongadas, y los errores en la medición se incrementan en mediciones próximas al límite de detección (Phillips *et al.*, 2001).

1.3.2.3.10 Quimioluminiscencia

Los medidores por quimioluminiscencia ofrecen una medición cuantitativa del óxido de nitrógeno (NO) contenido en el aire. El proceso se basa en la reacción en fase gas entre el óxido de nitrógeno y el ozono, para producir dióxido de nitrógeno (NO₂) en estado excitado, y una posterior luminiscencia que mide el aparato, según la **Ecuación 7**:



La conversión del amoníaco en óxido de nitrógeno (NO) mediante una reacción catalítica a 750 - 800°C permite que este método pueda ser utilizado para medir amoníaco (**Ecuación 8**).



Es un método de gran sensibilidad (hasta 1 ppb, precisión (0,5 ppb) y linealidad (1% de toda la escala). También permite la medición en continuo, con las ventajas que ello implica. Sin embargo el equipo tiene componentes caros y su mantenimiento es complicado.

Este método ha sido profusamente utilizado para las mediciones de amoníaco derivadas de granjas de aves (Demmers *et al.*, 1999; Groot Koerkamp y Bleijenberg, 1998; Koerkamp *et al.*, 1998; Robertson *et al.*, 2002; Seedorf y Hartung, 1999; Wathes *et al.*, 1997), de cerdos (Aarnink *et al.*, 1995; Aarnink *et al.*, 1996; Aarnink *et al.*, 1997; Canh *et al.*, 1998a; Demmers *et al.*, 1999; Demmers *et al.*, 2003; Groenestein *et al.*, 2003; Harris *et al.*, 2002; Heber *et al.*, 2001; Koerkamp *et al.*, 1998; Ni *et al.*, 1998; Ni *et al.*, 1999; Ni *et al.*, 2000; van der Peet-Schwering *et al.*, 1999; Vranken *et al.*, 2004), y de vacas (Koerkamp *et al.*, 1998; Rose, 2003; Seedorf y Hartung, 1999). También ha sido empleado en monitorización ambiental del amoníaco (Jambert *et al.*, 1997; Schjoerring *et al.*, 1998).

1.4 OBJETIVOS

Así, considerando la necesidad de conocer la realidad en cuanto a las emisiones de gases procedentes de la ganadería, a causa de su sustancial coste ambiental, y teniendo en cuenta todos los condicionantes técnicos de los que se ha hablado en los capítulos anteriores, el presente trabajo presenta como objetivo principal el desarrollo y puesta en funcionamiento de un sistema de medida de emisiones fiable, eficaz y de fácil manejo; principalmente destinado a la medida de las emisiones procedentes de los estiércoles de los animales, por ser éste el punto clave en relación a la cantidad total de gases emitidos, pero también orientada a la medida de las emisiones de gases producidas por pequeños animales, principalmente pollos y conejos.

Por otro lado, teniendo en cuenta que la producción de dióxido de carbono por parte de los animales es una de las bases de cálculo para estimar los regímenes de ventilación en alojamientos ganaderos, a través de balances de dicho gas, y que para poder realizar estos

cálculos es necesario conocer, de forma fidedigna las tasas de producción de CO₂ de los animales, se plantea como objetivo secundario dentro del presente trabajo la obtención de unos datos de partida, para la determinación de dicha información para conejos de cebo criados en las condiciones habituales de las granjas españolas.

2 DISEÑO DE LA CÁMARA

En este epígrafe se tratará la primera parte del presente trabajo, el diseño de la cámara realizado. Hay que considerar que el objeto de dicha cámara es la determinación de las emisiones tanto de estiércoles como de pequeños animales (principalmente pollos y conejos), abarcando así dos objetivos muy diferentes entre sí, con las dificultades de diseño que ello conlleva.

2.1 INTRODUCCIÓN

El diseño de una cámara para la medida de emisiones de gases es un proceso cuya complejidad radica en la orientación de uso pretendida para el equipo. Así, en función de los requerimientos de cada tipo de experimento o fuente de emisión (viva o inerte) las necesidades de ventilación, velocidad de aire, superficie, volumen, etc. son muy diferentes.

Se podría afirmar que las cuatro cuestiones de mayor importancia a tener en cuenta durante el diseño son: **la orientación de uso** que influirá directamente sobre la morfología de la cámara, **el tamaño o volumen** que determinará las dimensiones de la misma, el **material constructivo** que, aunque de menor relevancia no deja de ser determinante por las limitaciones que conlleva el uso de ciertos materiales, y, finalmente el régimen de **ventilación** de trabajo, que se trata de una de las cuestiones de mayor interés por la influencia directa que ejerce sobre las concentraciones de gases que se presentan en el interior de la cámara.

En los siguientes apartados se resume una revisión bibliográfica que tiene por objeto documentar algunas experiencias previas en el diseño y funcionamiento de cámaras, tanto de tipo dinámico como de tipo estático, que han sido de gran ayuda durante el proceso de diseño del equipo objeto del presente trabajo. Cabe resaltar que en lo referente a la tasa de ventilación, a causa de la heterogeneidad observada en los trabajos revisados, y que se trata de una cuestión específica y condicionada a las características de la propia cámara y del origen de las emisiones, no se ha llevado a cabo una documentación bibliográfica, simplemente se han realizado unos cálculos teóricos que se presentan en el apartado referente a la metodología de diseño.

2.1.1 Cámaras dinámicas

Como ya se ha comentado anteriormente, las cámaras dinámicas son recintos cerrados con al menos una entrada y una salida de gases por los que circula aire “limpio” de forma continua o discontinua.

Este punto se convierte pues en determinante de cara a la **morfología constructiva**, ya que se deben prever las entradas y salidas, considerando también las velocidades y direcciones que tomará el flujo de gas en el interior. De esta forma, es habitual encontrar cámaras dinámicas en forma cúbica con uno o dos de los extremos de morfología cónica, principalmente cuando se trata de realizar experiencias con estiércoles o purines (Arogo *et al.*, 2003; Heber *et al.*, 2002). Por otro lado, cuando se trata de desarrollar cámaras dinámicas con intención de alojar animales en su interior, (cámaras respiratorias), la morfología tiende a ser más sencilla por cuestiones puramente de facilidad de manejo, predominando en estos casos las cámaras con forma cúbica (McGinn *et al.*, 2004; Wang y Huang, 2005).

En lo referente al **tamaño o volumen** de la cámara, éste vendrá determinado de igual forma en función del uso para el que se diseñe. Así, en el caso de emplearse para la estimación de emisiones procedentes de estiércoles y purines, el tamaño viene determinado por cuestiones de manejo principalmente, siendo los volúmenes habituales de entre 0,1 y 0,5 m³ (Arogo *et al.*, 2003; Lague *et al.*, 2005; Leyris *et al.*, 2005; Pelletier *et al.*, 2005), mientras que si se pretende alojar animales en el interior, el tipo de animal será el determinante, encontrándose cámaras de hasta 63,5 m³ en cámaras para determinaciones en ganado vacuno (McGinn *et al.*, 2006).

Respecto a los **materiales constructivos** empleados en la construcción de las cámaras, hay que reseñar que la variabilidad es muy elevada, encontrándose cámaras de casi cualquier material (plásticos, metálicos, vidrio, etc.). En general sí que se observa una tendencia a utilizar materiales ligeros y resistentes que faciliten el manejo del equipo *v.g.* PVC (Leyris *et al.*, 2005; Smith *et al.*, 1995). Por otro lado, y principalmente enfocado a estudios con animales vivos, es común encontrar cámaras realizadas con cerramientos transparentes (p.ej. plexiglás) con el fin de reducir el estrés de los animales, además de poder observar su estado durante el experimento.

Un caso excepcional en este tipo de cámaras, son las cámaras flotantes (Heber *et al.*, 2002; Lim *et al.*, 2003). Estos equipos son peculiares en cuanto a su morfología y a los materiales utilizados para su construcción, ya que se utilizan para medir emisiones procedentes de superficies líquidas como los purines. Su uso se ha extendido debido a su versatilidad para medir las emisiones de este tipo de orígenes en condiciones bastante aproximadas a la realidad.

2.1.2 Cámaras estáticas

Hay que tener en cuenta que una cámara de tipo dinámico siempre puede ser empleada como cámara estática, simplemente sellando las entradas y salidas de aire, por ello parece interesante ampliar brevemente la información proporcionada anteriormente acerca de las cámaras de gases dinámicas.

Es importante reseñar que este tipo de cámaras son utilizadas principalmente para estimar las emisiones procedentes de una fuente superficial, siendo el ejemplo más habitual la medida de emisiones procedentes de estiércoles, bien con muestras extraídas de la explotación, o bien en el interior de la misma granja. Por ello, la **morfología constructiva** de estos equipos es, en general, más simple, siendo la mayoría de tipo cúbico (Brewer y Costello, 1999; Blanes-Vidal *et al.*, 2007; Senevirathna *et al.*, 2007) o circular (Gonzalez-Avalos y Ruiz-Suarez, 2001; Sommer *et al.*, 2004b; Skiba *et al.*, 2006), con las ventajas de manejo que ello conlleva. Esto viene determinado por la ausencia de un flujo de aire exterior (limpio), que pueda modificar las condiciones de emisión en el interior influyendo sobre los procesos de difusión y transporte de los gases.

Con respecto al **tamaño** de estas cámaras, en la bibliografía se encuentran valores muy diversos, desde cámaras pequeñas con un volumen inferior a $0,65 \text{ dm}^3$ (Gonzalez-Avalos y Ruiz-Suarez, 2001), hasta cámaras mucho más grandes con un volumen de algo más de $0,4 \text{ m}^3$ (Senevirathna *et al.*, 2007), aunque sí se observa una tendencia a diseñar equipos con tamaños intermedios, con un volumen de en torno a 15 o 20 dm^3 .

Finalmente, en lo que se refiere a los **materiales constructivos**, es habitual la tendencia a utilizar materiales resistentes y manejables de igual modo que en las cámaras dinámicas, aunque en este caso se presentan con mayor frecuencia cámaras realizadas con materiales metálicos (Blanes-Vidal *et al.*, 2007; Senevirathna *et al.*, 2007; Miller y Woodbury, 2006).

2.2 MATERIALES Y MÉTODOS

Para llevar a cabo el diseño de la cámara, se ha seguido un árbol de decisión en el que se ha fijado un doble objetivo, por un lado el registro de las emisiones procedentes de estiércoles y por otro lado el registro de emisiones procedentes de pequeños animales vivos.

Para diseñar una cámara que permita alcanzar dichos objetivos se deben tomar cuatro grandes decisiones, que son:

- Tamaño de la cámara
- Morfología de la cámara
- Material constructivo
- Tasa de ventilación

Posteriormente, sobre cada una de estas decisiones se presenta una serie de condicionantes, que determinarán finalmente el diseño a desarrollar. La **Figura 22** muestra el proceso en forma de árbol de decisión.

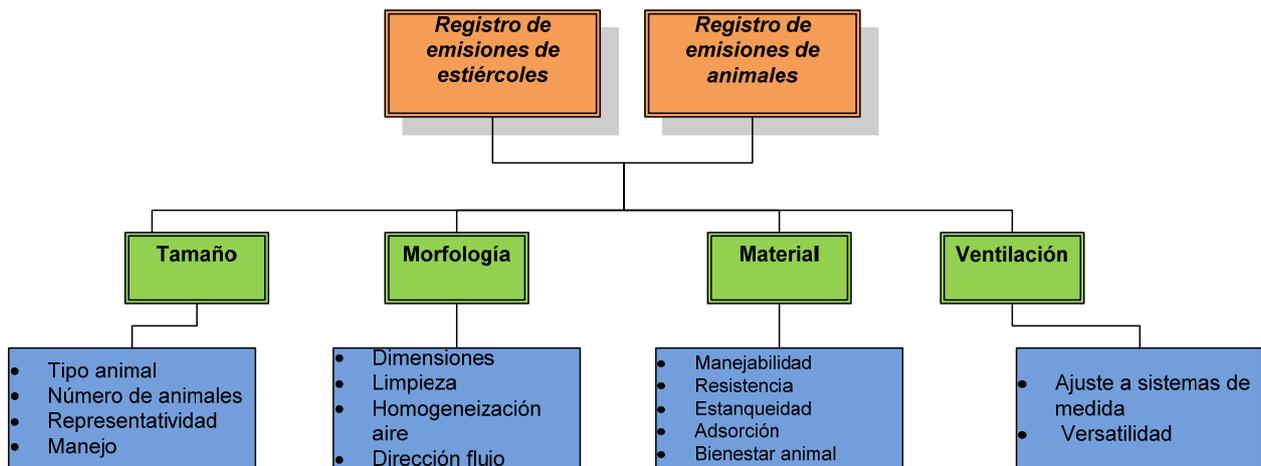


Figura 22. Proceso de decisión seguido para el diseño de la cámara

2.2.1 Tamaño de la cámara

En lo referente al tamaño de la cámara, existen cuatro condicionantes principales, estos son:

- Tipo de animal a introducir
- Número de animales
- Representatividad de la muestra
- Facilidad de manejo y versatilidad

Los dos primeros hacen referencia directa al registro de las emisiones procedentes de animales vivos, siendo necesario tener en cuenta el tamaño de los animales y el número de los mismos a introducir, para garantizar las condiciones de bienestar de los mismos en el interior de la cámara.

En el tercer caso, cuando se habla de representatividad de la muestra se hace referencia al registro de las emisiones procedentes de estiércoles, siendo necesario que la cantidad de estiércol a introducir sea representativa de la realidad, así como las emisiones que del mismo se generen.

Finalmente, hay que tener en cuenta que la cámara debe ser manejable, condicionante muy importante en la decisión acerca del tamaño, ya que es importante llegar a una solución de compromiso entre la representatividad de la muestra y la manejabilidad del equipo.

2.2.2 Morfología de la cámara

En este caso también son cuatro los puntos a tener en cuenta para tomar la decisión acerca de la morfología de la cámara:

- Dimensiones
- Facilidad de limpieza
- Homogeneización del aire interior
- Dirección del flujo de aire

Las dimensiones de la cámara están directamente relacionadas con los dos objetivos planteados, las emisiones de los animales y de los estiércoles. Así, es importante que los animales puedan moverse en el interior de la cámara (anchura y longitud), así como que tengan suficiente altura, y por otro lado, en cuanto a las emisiones procedentes de los estiércoles, es muy importante tener en cuenta la superficie sobre la que se dispondrán éstos, siendo uno de los parámetros más importantes que determinan la tasa de emisión.

El diseño de la cámara debe permitir una limpieza efectiva y relativamente sencilla, tanto en el caso de la presencia de animales donde es importante retirar las heces y la orina para evitar emisiones que interfieran en los resultados y en la salud de los propios animales, y cuando se introducen estiércoles, para evitar posibles emisiones no controladas por persistencia de sustratos no deseados.

Finalmente, son importantes las consideraciones referentes al ambiente interior de la cámara, principalmente en cuanto a la homogeneización de aire, que va a permitir una lectura de las concentraciones más precisa, además de evitar posibles problemas de salud por acumulación de gases en determinadas zonas. Por otro lado, la dirección del flujo de aire es determinante, de forma más significativa cuando se introducen estiércoles a causa de los procesos de difusión que se producen, los cuales pueden verse favorecidos en caso de que el aire incida sobre la superficie de emisión.

2.2.3 Material constructivo

Respecto a los materiales a utilizar en la construcción de la cámara, los cuatro condicionantes más importantes a considerar son los siguientes:

- Manejabilidad del equipo
- Resistencia de la cámara
- Estanqueidad
- Adsorción de gases
- Bienestar de los animales

Es muy importante tener en cuenta que el equipo debe ser fácilmente transportable, tal y como se ha comentado anteriormente al hablar de la morfología de la cámara. Para ello, es necesario que los materiales utilizados sean ligeros.

Por otro lado, y considerando el entorno en que se pretende emplear el equipo, es muy importante que se asegure su resistencia, tanto en lo referente a agresiones físicas (golpes, mordeduras, etc.), como a las agresiones físicas procedentes de los gases emitidos y de los propios estiércoles. Es importante pues, llegar también en este caso a una solución de compromiso con el punto anterior, de forma que se elija un material resistente, pero a su vez ligero.

La adsorción de los gases en el material de la cámara puede suponer un problema ya que es posible que interfiera en las concentraciones de gases que se registran en el interior, simplemente por evitar la correcta homogeneización de la sustancia a determinar con el aire. Así pues, este es un punto importante y se debe tratar de seleccionar materiales que no dispongan de esta propiedad.

Finalmente, es importante garantizar que los animales van a disponer de luz y de contacto visual con el exterior de la cámara, por lo que resulta necesario que el material a emplear sea transparente.

2.2.4 Régimen de ventilación

Tal y como se ha comentado anteriormente, el régimen de ventilación es una de las cuestiones más importantes en el diseño de una cámara dinámica, a pesar de ello es el último paso que debe considerarse ya que depende de forma directa de las decisiones tomadas previamente en cuanto al tamaño, la morfología y el material elegidos.

Es muy importante considerar que el caudal de ventilación a instalar depende directamente de la fuente emisora de gases y su correspondiente tasa de emisión, y del material de medida de gases de que se disponga, ya que el objetivo de la ventilación es establecer en el interior de la cámara unos valores de concentración de gases que puedan ser medidos con facilidad y que no afecten negativamente a la salud de los animales alojados en el interior, si es el caso.

Para poder llevar a cabo los cálculos necesarios para estimar el caudal de ventilación necesario en cada caso, se puede utilizar la **Ecuación 9** según la cual, conociendo la tasa de emisión de cada gas, y la concentración del mismo en el aire que entra en la cámara, se pueden determinar las concentraciones de aire que se producirán en el interior de la cámara para diferentes caudales teóricos, siempre que el aire del interior de la cámara se encuentre

completamente homogeneizado, cuestión que se puede abordar con la instalación de un pequeño ventilador en la cámara.

$$C_i = \frac{\text{Emisión}}{\text{Caudal}} + C_e \quad \text{Ecuación 9}$$

Siendo:

- C_i**: Concentración interior de gas (mg/m³).
C_e: Concentración exterior de gas (mg/m³).
Emisión: Producción de gas (mg/h).
Caudal: Caudal de ventilación (m³/h)

Considerando pues, que las tasas de emisión de cada gas son extremadamente variables, no resulta operativo proponer unos caudales recomendados para cada caso, por ello, a modo de ejemplo, en los dos próximos epígrafes se propondrá la metodología de trabajo para determinar la ventilación cuando se introducen pequeños animales y cuando se introducen algunos tipos de deyecciones.

Por otro lado, y con el fin de simplificar los cálculos, se puede considerar que, en lo referente al sistema de medida de gases que limitará las concentraciones máxima y mínima de cada gas, unos valores de referencia ajustados a los usos posteriores de la cámara son los recomendados para el sistema de medida de gases de tecnología fotoacústica (INNOVA 1412 *Photoacoustic Field Gas-Monitor*). La **Tabla 2** resume estos valores para cada gas.

| Tabla 2. Concentraciones máxima y mínima recomendadas para la medida de gases | | |
|--|--------------------------------------|--------------------------------------|
| Gas | Límite inferior (mg/m ³) | Límite superior (mg/m ³) |
| NH ₃ | 2 | 50 |
| CO ₂ | 0 | 10.000 |
| CH ₄ | 4 | 50 |
| N ₂ O | 2 | 30 |

Fuente: Documentación técnica INNOVA 1412 Photoacoustic Field Gas-Monitor

Finalmente, es necesario proporcionar un valor estándar para las concentraciones de gases de entrada. En un principio, cada vez que se pretenda diseñar un experimento, es necesario registrar dichas concentraciones en el lugar donde se sitúe la cámara, pero como aproximación, se pueden tomar los valores propuestos por Seinfeld y Pandis (1998) que se resumen en la **Tabla 3**:

| Tabla 3. Concentraciones atmosféricas medias de algunos gases | |
|--|---|
| Gas | Concentración exterior (mg/m ³) |
| NH ₃ | 1x10 ⁻⁵ |
| CO ₂ | 640 |
| CH ₄ | 1 |
| N ₂ O | 0,6 |

Fuente: Adaptado de Seinfeld y Pandis (1998)

2.2.4.1 Emisiones procedentes de animales vivos

Considerando que la cámara se pretende diseñar para introducir en ella pequeños animales, y que los animales de mayor interés con este condicionante son los pollos de engorde y los conejos, los cálculos que se realicen para determinar el flujo de ventilación necesario deben encaminarse a cumplir con las necesidades de dichos animales y del sistema de medida.

Por otro lado, las emisiones de gases diferentes del dióxido de carbono en éstos animales se encuentran muy poco documentada, de tal forma que resulta muy complejo proporcionar un valor de emisión, *a priori* con el que realizar los cálculos, por ello, en este apartado se realizarán los cálculos para las emisiones de CO₂ de ambas especies.

Así, siguiendo las recomendaciones del CIGR (2002) las emisiones de CO₂ de los pollos de engorde se calculan siguiendo la **Ecuación 10**:

$$E = 0,185 \times \frac{10,62 \times Pm}{1.000} \quad \text{Ecuación 10}$$

Siendo:

- E:** Emisión de CO₂ (mg/h).
Pm: Peso metabólico del animal (PV^{0,75}).

Al tratarse pues la emisión de CO₂ de una variable que cambia con el peso de los animales, se pueden realizar las estimaciones para el momento más desfavorable del ciclo que es al final del mismo, cuando los animales alcanzan un peso vivo en torno a los 2.500 g.

Respecto a las emisiones de CO₂ procedentes de los conejos de cebo, la misma fuente proporciona un valor de emisión de dióxido de carbono de 4.432,23 mg/h para animales con un peso vivo de 2.500 g.

2.2.4.2 Emisiones procedentes de estiércoles y purines

Tal y como se ha comentado anteriormente, la variabilidad que existe en este punto respecto a las características de las deyecciones que se pueden introducir en la cámara, así como de los gases que de las mismas se puedan generar. A modo de ejemplo, se calcularán aquí las tasas de ventilación necesarias para registrar correctamente las emisiones de diversos gases procedentes de estiércoles de pollo y purines de porcino. La **Tabla 4** recoge la información acerca de las tasas de emisión para cada caso.

| Tabla 4. Emisiones de gases procedentes de estiércol de pollos y purín de porcino | | | | |
|--|---|-------------------------------|---|------------------------------|
| Gas | Estiércol pollo (mg/h·m ²) | Referencia | Purín porcino (mg/h·m ²) | Referencia |
| NH ₃ | 310 | Miles <i>et al.</i> (2006) | 100 | Amon <i>et al.</i> (2005) |
| CO ₂ | 9.700 | | 12.500 | |
| CH ₄ | 42,8 | | 170 | |
| N ₂ O | 5,6 | | 50 | |

2.3 RESULTADOS

2.3.1 Morfología

La cámara dispone de tres cuerpos básicos, el central se trata de un cubo rectangular abierto en la parte inferior, sobre el que se acoplan los dos laterales con forma de pirámide de cuatro lados, pero sin vértices. La **Figura 23** recoge un esquema de la morfología de la cámara en el que se observan los tres cuerpos de la misma.

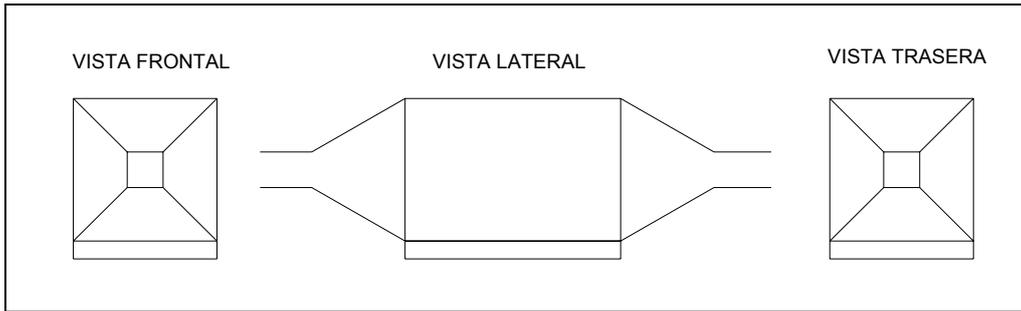


Figura 23. Esquema de la morfología de la cámara

2.3.2 Tamaño

Las dimensiones de la cámara (en cm) se presentan en la **Figura 24**. El volumen de la misma, considerando dichas medidas, es de $0,1705 \text{ m}^3$.

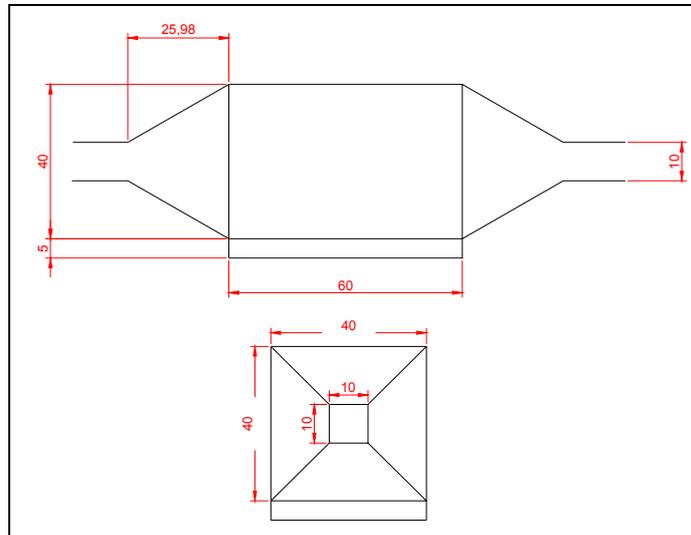


Figura 24. Dimensiones de la cámara

2.3.3 Materiales

La estructura de la cámara está realizada en polimetacrilato de metilo, polímero del ácido metacrílico, mientras que la base se realizó en acero inoxidable. La **Figura 25** muestra una imagen de la cámara en la que se observan los materiales empleados.



Figura 25. Fotografía de la cámara en la que se observan los materiales constructivos

2.3.4 Ventilación

Los cálculos de las concentraciones de cada gas en emisiones procedentes de los animales y de los estiércoles se presentan en las **Figuras 26 y 27** respectivamente, junto con los rangos de medida para cada uno de ellos.

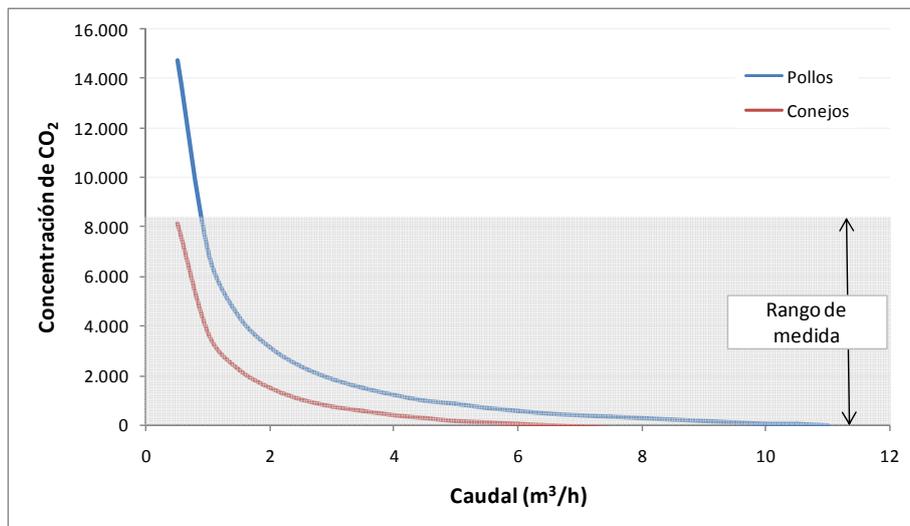


Figura 26. Conc. de CO₂ a varios caudales para emisiones de pollos y conejos

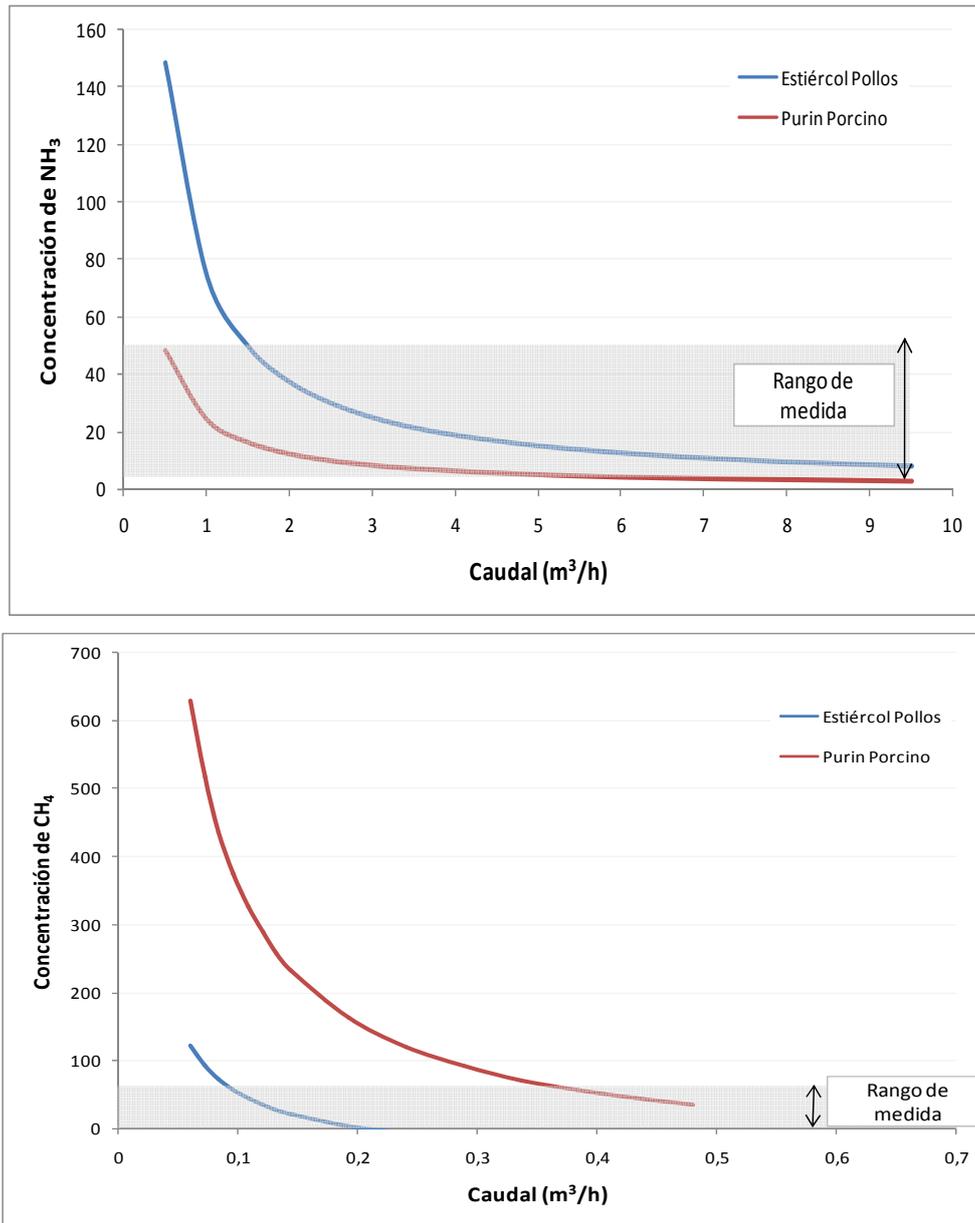


Figura 27a. Conc. de gases a varios caudales para emisiones de estiércoles y purines

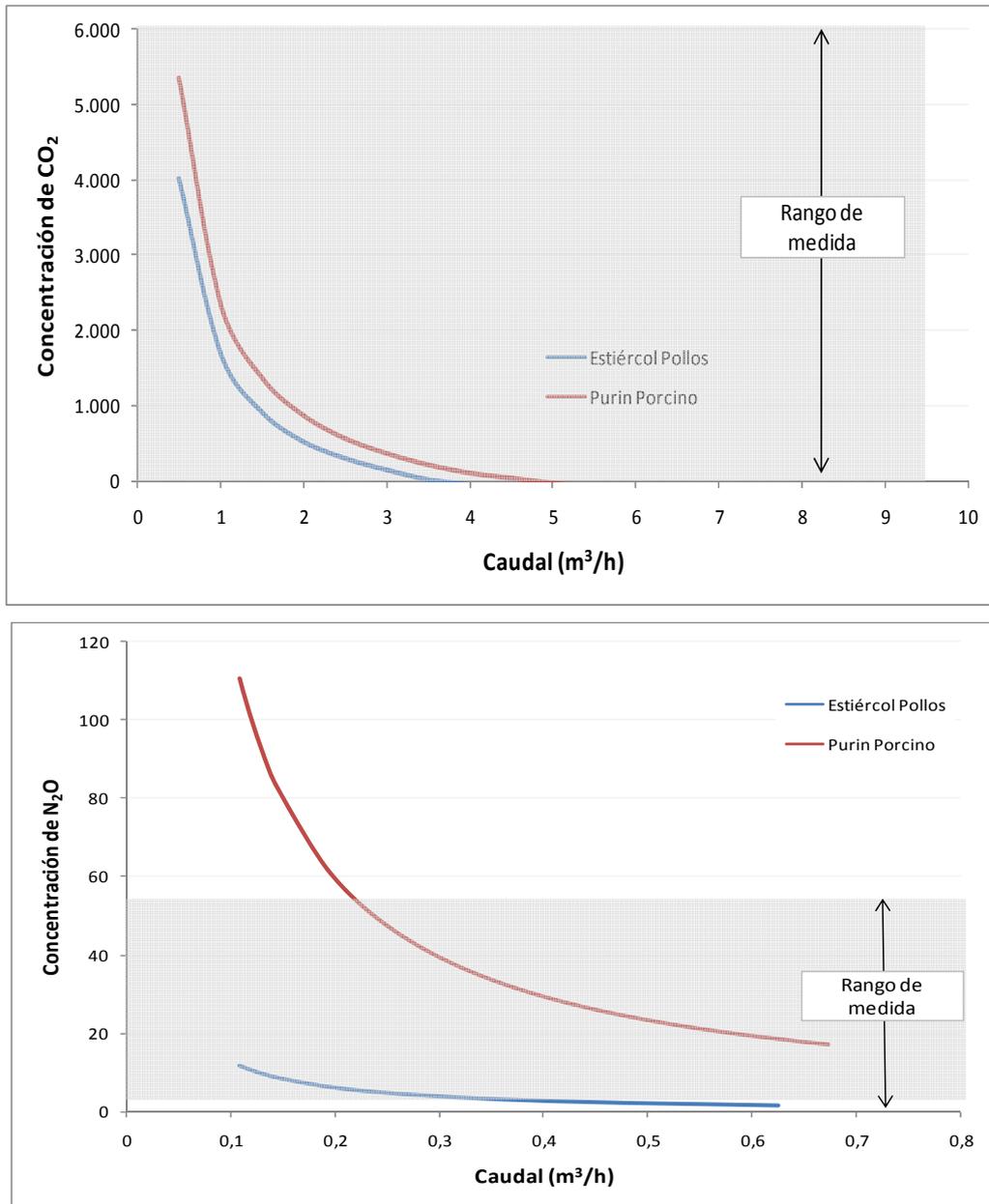


Figura 27b. Conc. de gases a varios caudales para emisiones de estiércoles y purines

Se puede observar como en el caso de las concentraciones de dióxido de carbono y amoníaco, independientemente de la fuente emisora, caudales de entre 2 y 5 m³ parecen adecuados para poder registrar dichas concentraciones, mientras que en el caso del metano y el óxido nitroso el caudal debe ser mucho menor, aproximadamente un orden de magnitud menos.

2.4 DISCUSIÓN

2.4.1 Morfología

En lo que respecta a la determinación de emisiones procedentes de estiércoles y purines, la morfología de la cámara no es un punto determinante en este caso, ya que a causa

del tamaño elegido y los caudales de trabajo aproximados, no es significativo el efecto del flujo de aire sobre las mismas. Independientemente de este hecho, la morfología de las cámaras para el registro de emisiones procedentes de esta fuente es variable, encontrándose tanto de tipo cúbico (Amon *et al.*, 2001; Brewer y Costello, 1999), de tipo túnel (Leyris *et al.*, 2005), e incluso de tipo cilíndrico (Blanes-Vidal *et al.*, 2007; Boriack, 2005; Skiba *et al.*, 2006).

En cuanto al registro de las emisiones procedentes de animales vivos, en un principio la morfología parece adecuada, aunque no existen muchos precedentes en los que se haya utilizado este sistema en pequeños animales, sí que se dispone de una forma similar a la cámara utilizada por Wang y Huang (2005) para la determinación de emisiones en pollos de engorde.

2.4.2 Tamaño

El tamaño de la cámara, desde el punto de vista de la utilización para la determinación de emisiones procedentes de pequeños animales, es muy similar al empleado por Wang y Huang (2005) para la determinación de las emisiones de gases en pollos de engorde (60x60x45 cm).

En cuanto al registro de emisiones procedentes de estiércoles, cámaras con tamaños similares han sido empleadas para el registro de emisiones procedentes de estiércol de vacuno (\varnothing 30 cm) (Blanes-Vidal *et al.*, 2007) y ovino (\varnothing 40 cm) (Skiba *et al.*, 2006) varios usos (\varnothing 50 cm) (Boriack, 2005). También se han utilizado cámaras con tamaños bastante inferiores (\varnothing 15,2 cm) (Sommer *et al.*, 2004b), y con tamaños muy superiores 122x076x41 cm (Brewer y Costello, 1999), 900x300x200 cm (Amon *et al.*, 2001) y 120x15x15 cm (Leyris *et al.*, 2005), de lo que se deduce que no es uno de los factores determinantes siempre y cuando se disponga de un tamaño mínimo que asegure la representatividad de la muestra.

2.4.3 Materiales

Los materiales utilizados cumplen con las necesidades estipuladas *a priori*, en cuando a la ligereza, robustez, transparencia y ausencia de adsorción de los gases.

Por otro lado, en cuanto a los materiales utilizados en trabajos anteriores, también existe una gran diversidad, encontrando algunos casos en los que se empleó plexiglás (Brewer y Costello, 1999), PVC (Leyris *et al.*, 2005), e incluso acero inoxidable (Blanes-Vidal *et al.*, 2007; Boriack, 2005).

2.4.4 Ventilación

El flujo de ventilación es, como ya se ha dicho anteriormente, uno de los puntos más importantes, pero a su vez, tiene la ventaja de que puede ser modificado con cierta facilidad. Así, tal y como se ha observado en los cálculos teóricos realizados anteriormente, los caudales

necesarios son diferentes en función de los gases que se pretenda analizar, además de que debe tenerse en cuenta que el sistema utilizado para medir las concentraciones determinará en gran medida el caudal a utilizar.

Por otro lado, cabe destacar que en los cálculos teóricos realizados anteriormente se han tomado datos de concentraciones de gases en el exterior correspondientes a una atmósfera limpia, por lo que si las determinaciones se van a realizar en una zona con una concentración del gas a determinar más elevada en el exterior de la cámara, los caudales teóricos calculados no serían válidos.

Por ello, es necesario determinar previamente a la realización del experimento las condiciones de trabajo, tanto en lo que respecta al sustrato sobre el que se van a determinar las emisiones, como a los gases que se pretenden medir, como al entorno en el que se van a realizar las medidas, con el fin elegir correctamente el régimen de ventilación a adoptar en cada experimento.

3 PUESTA EN FUNCIONAMIENTO DE LA CÁMARA

3.1 INTRODUCCIÓN

La puesta en funcionamiento de la cámara dinámica se llevó a cabo con la introducción en la misma de conejos de cebo, para determinar la dinámica de emisión de dióxido de carbono procedente de la respiración y la fermentación entérica de los animales. Esta decisión se tomó con el fin de completar trabajos previos acerca de las emisiones de gases de efecto invernadero en granjas intensivas de conejos (Estellés, 2006), además de abordar la puesta en funcionamiento del equipo en condiciones más limitantes que en el caso de las emisiones procedentes de los estiércoles.

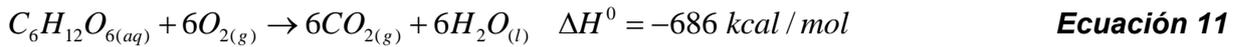
3.1.1 Producción de CO₂ por parte de los animales

La mayor parte de las emisiones de dióxido de carbono en los animales proceden del proceso de **respiración**. Por otro lado, durante los procesos de digestión de alimentos en los que toman partes microorganismos que ayudan en la descomposición y transformación de materias, también pueden producirse **procesos de fermentación** que den lugar a la emisión de ciertas cantidades de dióxido de carbono. Además de esto, también se producen emisiones de dióxido de carbono durante la **descomposición del estiércol**.

3.1.1.1 Emisiones de CO₂ procedentes de la respiración

La respiración en animales consiste en el movimiento recíproco del aire hacia dentro y fuera de los pulmones, según el cual los animales obtienen el oxígeno del ambiente y lo utilizan para la respiración celular. El dióxido de carbono generado se libera finalmente al ambiente (Randall *et al.*, 1998).

Este proceso general, se fundamenta en el mecanismo de la respiración celular, que es el proceso según el cual las moléculas de carbohidratos, proteínas, y grasas, con gran energía en forma de enlaces químicos estables, se convierten en el animal en CO₂, H₂O y compuestos nitrogenados de bajo peso molecular, liberándose la energía atrapada en los enlaces químicos de estas grandes moléculas. Los átomos de carbono, hidrógeno y oxígeno en la celulosa, por ejemplo, se encuentran en un estado mucho más ordenado que el que tienen el CO₂ y el H₂O, por lo que la degradación metabólica de la celulosa representará un incremento de la entropía. Este proceso se compone de un conjunto de reacciones bioquímicas. La **Ecuación 11** resume, a modo de ejemplo, el proceso de obtención de energía a través de la descomposición de la glucosa.



Las emisiones de CO₂ procedentes de los conejos, han sido determinadas en escasas ocasiones. Así, en un trabajo de (Villagrà *et al.*, 2004) se propone un valor emisión de 0,355 l/h de CO₂ por cada kilogramo de peso vivo de los animales. Por otro lado, en dos estudios similares en los que se estudió la producción de CO₂ en conejos de cebo, se midieron valores de producción de dióxido de carbono de entre 0,60 y 0,66 l/hora/Kg peso vivo (Kiwull-Schöne *et al.*, 2001; 2005). El CIGR (2002), por su parte, propone unos valores de producción de CO₂ para conejos variables en función del peso y que oscilan entre los 0,72 l/h para animales de 0,5 kg de p.v. y los 3,77 l/h para conejos de 5 kg de peso vivo.

3.1.1.2 Emisiones de CO₂ procedentes de la fermentación entérica

La digestión de los alimentos que llevan a cabo los animales se compone de tres procesos principales:

- Digestión mecánica
- Digestión química
- Digestión microbiológica

En la primera de ellas se produce la descomposición del alimento a través de procesos de presión y cizallamiento. Esta fase es llevada a cabo por prácticamente la totalidad de las especies animales.

Por otro lado existe una descomposición de tipo químico en la cual, a través de las propiedades de ciertas sustancias secretadas en el tracto digestivo, se descomponen las moléculas en productos fácilmente asimilables.

Finalmente, en los animales existe un proceso de digestión microbiológico. En esta fase son los microorganismos que se encuentran en el tracto digestivo del animal los que ayudan en el proceso de descomposición del alimento. Este proceso se produce en casi todas las especies aunque en algunas es mucho más importante, es el caso de los rumiantes, los équidos y los conejos, los cuales disponen en el tracto digestivo de importantes cavidades en las que se localizan los microorganismos responsables de estos procesos. Como consecuencia de esta degradación biológica de los alimentos se producen una serie de subproductos, entre los que se encuentran gases como el metano y el dióxido de carbono (Moss *et al.*, 2000). Estos gases se liberan posteriormente a través de la exhalación y las ventosidades (**Figura 28**). A este proceso se le denomina **fermentación entérica**.

Las cantidades de gases que se producen durante los procesos de fermentación entérica se encuentran condicionadas por varios factores, destacando entre ellos el tipo de animal y su

alimentación, principalmente la digestibilidad de la dieta el tipo de alimentación del animal, además del tipo de animal y la digestibilidad de la dieta (Lelieveld *et al.*, 1998; Jongebreur *et al.*, 2005).

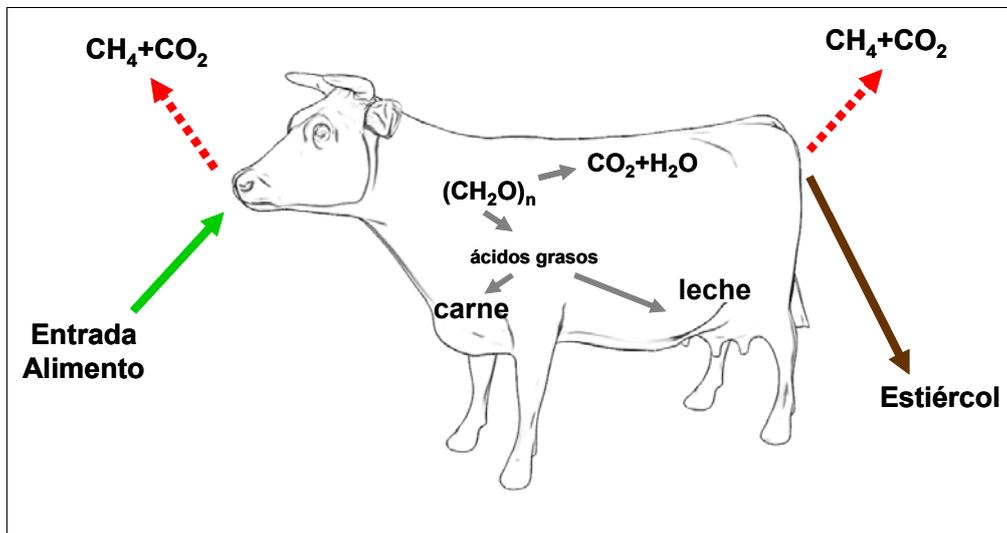


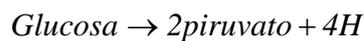
Figura 28. Fermentación entérica en rumiantes

Fuente: Elaboración propia

Como ya se ha comentado anteriormente, la producción de determinados gases durante la digestión de los alimentos no es exclusiva de los animales rumiantes ya que ciertos animales monogástricos como el cerdo, o pequeños mamíferos como el conejo también producen gases en cantidades significativas al fermentar los carbohidratos en su tracto digestivo (Moss *et al.*, 2000; Langer, 2002). Esto es debido a la presencia de enzimas externos al animal que participan en la digestión (digestión aloenzimática).

El proceso de digestión de los carbohidratos es complejo y se compone de diversas reacciones en equilibrio estequiométrico. Se puede resumir este proceso como se expresa en las **Ecuaciones 12 a 16** (Moss *et al.*, 2000), que resumen el proceso de fermentación entérica. Así, durante la descomposición de los carbohidratos, el hidrógeno metabólico en forma de protones reducidos (H⁺) puede ser utilizado durante la síntesis de ácidos grasos volátiles o incorporado a la materia orgánica microbiana:

Reacciones de producción de H:



Reacción de Embden-Meyerhof-Parnas

Ecuación 12



Ecuación 13

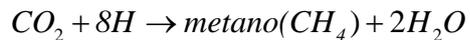
Reacciones de eliminación de H:



Ecuación 14



Ecuación 15



Ecuación 16

3.1.1.3 Emisiones de CO₂ procedentes de la descomposición del estiércol

Durante los procesos de almacenamiento y tratamiento de los residuos orgánicos se producen fermentaciones bacterianas que liberan una mezcla de gases (biogás) que contiene metano y dióxido de carbono (Moller *et al.*, 2004). El estiércol contiene una porción de sólidos volátiles (orgánicos), como grasas, carbohidratos y proteínas, que quedan disponibles como fuente de alimento y energía para el crecimiento y desarrollo de las bacterias anaerobias.

El proceso de la fermentación anaerobia que producen estas bacterias se produce en dos fases principales (Monteny *et al.*, 2006):

- a) En la primera de ellas, se produce un crecimiento rápido de bacterias acidogénicas, que sintetizan los sólidos volátiles del estiércol produciéndose AGV, H₂ y CO₂.
- b) Durante la segunda fase, otro grupo de bacterias (metanogénicas) degradan estos ácidos grasos produciendo metano y dióxido de carbono en concentraciones entre el 50-75% y el 30-40%, respectivamente (Flotats *et al.*, 2004).

La **Figura 29** muestra el esquema del proceso de fermentación anaerobia con generación de metano y CO₂.

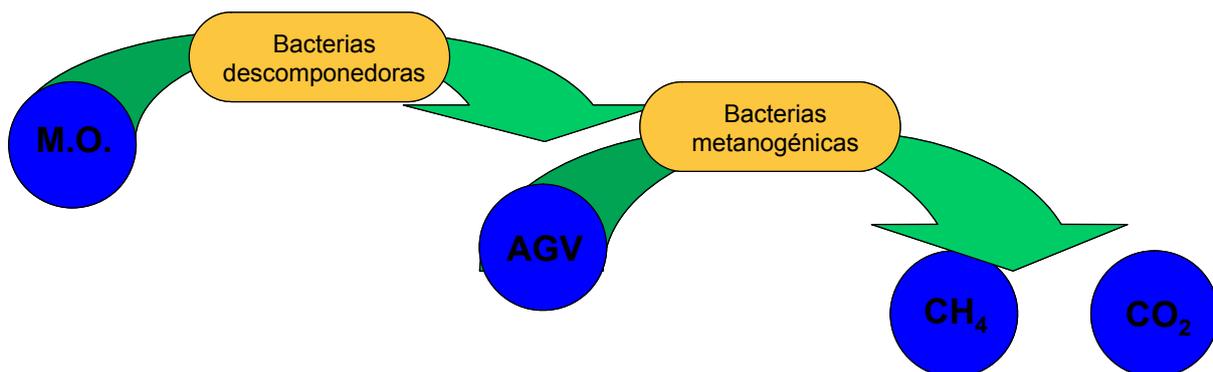


Figura 29. Descomposición de la materia orgánica en condiciones anaerobias

Fuente: Elaboración propia

Las condiciones más favorables para la producción de gases durante este proceso se producen cuando el estiércol es almacenado en estado líquido (de forma que se minimiza la presencia de oxígeno). Existen tres factores básicos que condicionan la cantidad de gases producidos:

- 1) La temperatura ambiente.
- 2) La temperatura del estiércol.
- 3) El tiempo de almacenamiento.

Estos tres factores influyen en la producción total ya que afectan directamente al crecimiento de las bacterias responsables de las reacciones. En este sentido, las emisiones normalmente se incrementan al aumentar la temperatura y el tiempo de almacenamiento (Mangino *et al.*, 2001), siendo muy reducidas durante las primeras 24 horas tras la producción (Sommer *et al.*, 2004b).

Por otro lado, durante la descomposición de los compuestos nitrogenados, también se produce una cantidad considerable de gases. Un ejemplo puede ser la degradación de la urea que produce CO₂ según las **Ecuaciones 17 y 18** (Beline *et al.*, 1998):



Las emisiones de CO₂ procedentes de esta fuente no son despreciables, llegando a suponer la volatilización del 20% del carbono presente en el estiércol (Wolter *et al.*, 2004).

3.1.2 Balances de dióxido de carbono

Para poder de las emisiones de gases o polvo procedentes de las granjas es necesario poseer datos fiables acerca de los caudales de ventilación. Para realizar esta determinación, se pueden colocar las entradas o salidas de aire boquillas calibradas; también pueden instalarse caudalímetros en todas las entradas o salidas de aire de la granja. Ambos métodos son muy precisos, pero conllevan dificultades técnicas y económicas a causa de la gran cantidad de entradas y salidas de aire que pueden existir en una explotación. Por ello, los métodos indirectos, como es el caso de los balances de dióxido de carbono, se presentan como herramientas muy útiles en este ámbito (van Ouwerkerk y Pedersen, 1994).

Otra de las ventajas de este sistema es la posibilidad de estimar las tasas de ventilación en edificios con ventilación natural en los que las entradas y/o salidas de aire son difícilmente abordables desde el punto de vista de la medición directa (v.g. caballetes corridos).

Así, la aplicación de estas metodologías ha sido ampliamente utilizada en los últimos años, en diversos países y para diferentes especies ganaderas (Blanes y Pedersen, 2005; Pedersen *et al.*, 1998; Phillips *et al.*, 1998; Seedorf *et al.*, 1998; van Ouwerkerk y Pedersen, 1994; von Wachenfelt *et al.*, 2001).

3.1.2.1 Fundamento

El cálculo de la tasa de ventilación utilizando este sistema se basa en la ecuación general del balance de masas, asumiendo que las concentraciones de gases en el aire exterior de la nave son las mismas que las del aire que entra en la misma y que la concentración de gas del interior de la nave es la misma que la del aire que sale. Además, debe considerarse que no existe una acumulación de gas a lo largo del tiempo. Todas estas condiciones se cumplen, en condiciones normales, en las explotaciones ganaderas.

Así, la ecuación a través de la cual se calcula la tasa de ventilación está basada en las concentraciones interior y exterior de dióxido de carbono (**Ecuación 19**):

$$V = \frac{C}{\Delta C \times 10^{-6}} \quad \text{Ecuación 19}$$

Siendo:

V: Caudal (m³/h).

C: Producción de dióxido de carbono (m³/h).

ΔC: Diferencia de concentración interior y exterior de CO₂ (ppm).

3.1.2.2 Consideraciones prácticas

Tal y como se puede deducir observando la ecuación presentada en el apartado anterior, el punto clave a considerar es la tasa de emisión de gas en el interior del alojamiento, ya que las concentraciones de dióxido de carbono se pueden medir de forma más o menos sencilla y fiable.

De este modo, es imprescindible disponer de datos fiables acerca de las emisiones de dióxido de carbono procedentes, tanto de los propios animales, como de las fermentaciones que se producen en el estiércol de los mismos en caso de que éste se acumule en el interior de las naves.

Uno de los principales problemas de esta ecuación es la variación diaria que existe en la producción de dióxido de carbono en las granjas, de forma que si se toma un valor de producción de dióxido de carbono medio diario el error cometido es significativo (Pedersen *et al.*, 1998). Dicha variación a lo largo del día tiene una gran relación con los parámetros de actividad de los animales y sus pautas de comportamiento (horas de alimentación, movimiento, descanso, etc.) (Phillips *et al.*, 1998). Así, este problema puede solucionarse si se conocen los ritmos de actividad de los animales, multiplicando por un factor de corrección el resultado de la (**Ecuación 19**).

Este factor de corrección se denomina “actividad relativa” y se expresa como la actividad de cada momento (normalmente periodos de una hora) respecto a la actividad media diaria (CIGR, 2002).

En general, los valores de producción de dióxido de carbono pueden encontrarse en la bibliografía, siendo un ejemplo el 4º Informe del grupo de trabajo en climatización de alojamientos ganaderos (CIGR, 2002), en el que se recogen estos valores para la mayor parte de especies tras realizar una extensa recopilación bibliográfica. En este mismo documento se presentan también, para algunas especies ganaderas, las curvas de actividad relativa (**Figura 30**) con las que poder calcular las producciones de dióxido de carbono de forma horaria.

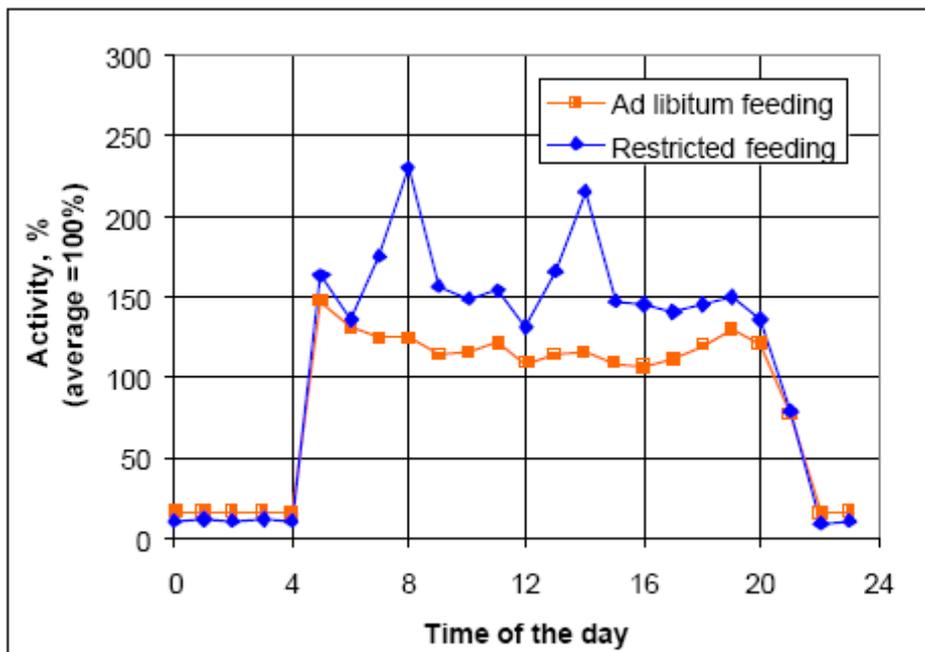


Figura 30. Actividad diaria relativa en pollos de engorde

Fuente: CIGR (2002)

A pesar de disponer de unos valores de referencia bibliográficos para la mayor parte de las especies, en conejos de cebo los valores propuestos para la producción de dióxido de carbono carecen de estudios de investigación como apoyo. Caso similar se presenta con las pautas de actividad, que en este caso ni siquiera son proporcionadas en el documento mencionado anteriormente.

Por ello, la obtención de dichos datos se antoja muy interesante para poder llevar a cabo determinaciones de las emisiones procedentes de las explotaciones cunícolas, más aún conociendo la importancia de dicha producción en los países del arco mediterráneo.

3.2 MATERIALES Y MÉTODOS

3.2.1 Planteamiento metodológico general

Tal y como se ha explicado anteriormente, para poder estimar las emisiones de gases procedentes de una fuente determinada en el interior de una cámara dinámica, es necesario conocer dos factores principales: el caudal de ventilación de la misma, y las concentraciones de gases que se producen en el tiempo, tanto en el interior como en el exterior de dicha cámara.

Así, el planteamiento metodológico general referente a la puesta en funcionamiento de la cámara dinámica se divide en dos grandes apartados, en primer lugar la determinación del **caudal de trabajo** de la cámara en diferentes condiciones, posteriormente, y ya con el objetivo de comprobar el correcto funcionamiento de la misma con conejos de cebo, el desarrollo de un **balance de dióxido de carbono** en la cámara.

3.2.2 Determinación del caudal de trabajo

La determinación del caudal de trabajo se abordó siguiendo un doble planteamiento. En primer lugar se trató de estimar la producción de dióxido de carbono por parte de los animales utilizando la cámara como una cámara cerrada e introduciendo los animales para observar la dinámica de producción de gas. Así, con estos conocimientos previos aproximados, se determinaron unos caudales de trabajo con los que se calibró la cámara posteriormente.

3.2.2.1 Experimento en cámara cerrada

Con el fin de obtener datos previos acerca de la tasa de producción de CO₂ de conejos de cebo, se procedió a sellar todas las entradas y salidas de aire de la cámara dinámica diseñada, quedando así convertida en una cámara estática (**Figura 31**).



Figura 31. Detalle del sellado de la cámara

Posteriormente se introdujeron en la misma dos conejos de cebo (de peso conocido), durante un periodo de tiempo aproximado de quince minutos. Dentro de la cámara se introdujo un sistema de medida de gases de tipo electroquímico, con una precisión de ± 100 ppm (DRÄGER X-Am 7000), con el que se registraron las concentraciones de gases en continuo, con un intervalo de tiempo de 10 segundos. También se registraron las condiciones ambientales (T^a y HR) en el interior de la cámara durante el experimento. Se introdujo también una fuente de agua. El proceso se repitió tres veces utilizando cuatro animales diferentes. La **Figura 32** muestra la cámara cerrada con los animales en el interior. Se observa a la izquierda el aparato de medida de gases y en la zona derecha la fuente de agua.

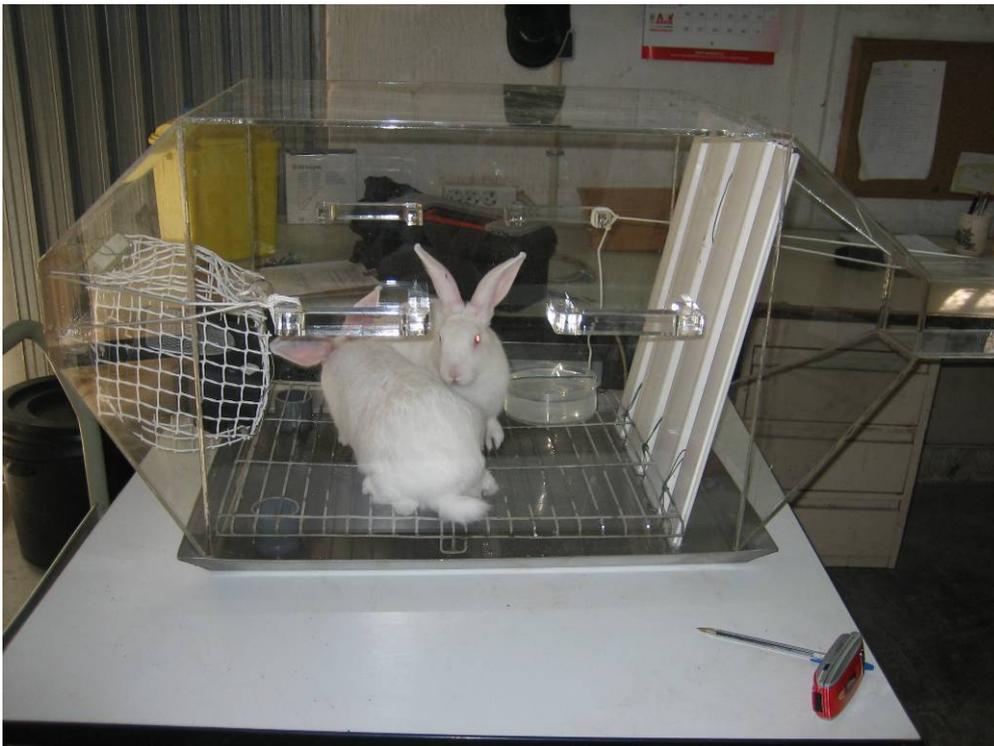


Figura 32. Experimento en cámara cerrada

Posteriormente se calcularon las tasas de emisión de los animales, tomando como datos de base el incremento de la concentración registrado, el volumen de la cámara, la duración de cada prueba y el peso de los animales introducidos cada vez.

Finalmente, para calcular el caudal mínimo recomendado correspondiente a cada caso se aplicó la (**Ecuación 20**).

$$V(m^3/h) = \frac{\text{Emisión } CO_2 (m^3/h)}{\text{Conc. } CO_2 \text{ máxima} - \text{Conc. } CO_2 \text{ exterior}} \quad \text{Ecuación 20}$$

Siendo:

V: Caudal (m^3/h).

Emisión CO_2 : Producción de dióxido de carbono en cada prueba (m^3/h).

[CO₂]máx: $5 \cdot 10^{-3}$ (límite de detección).

[CO₂]ext: $4 \cdot 10^{-4}$.

La emisión de dióxido de carbono por parte de los conejos se calculó en función del incremento de concentración producido en el interior de la cámara y del tiempo de permanencia de los animales en la misma.

3.2.2.2 Cálculo del caudal de funcionamiento

Una vez conocido el caudal aproximado necesario para mantener las condiciones ambientales adecuadas en el interior de la cámara, se procedió a introducir una bomba de aire (**Silent Pump AC-9902**) con la que extraer dicho caudal de forma continua. Una vez instalada la bomba de extracción se procedió a comprobar el caudal de diseño de la misma a través de un balance de dióxido de carbono.

Para ello se introdujo en la cámara un sensor de dióxido de carbono con tecnología de absorción infrarroja (**Vaisala CARBOCAP[®] GMT 222**) con precisión de ± 20 ppm, conectado a través de un circuito electrónico de reducción de voltaje, a un datalogger (**HOBO[®] H08-004-02**) en el que se registraron los valores de voltaje proporcionados por el sensor cada cinco segundos. Además, para adaptar el voltaje de salida del transductor de dióxido de carbono (0-10V), al voltaje de entrada del datalogger (0-2,5V), se realizó un montaje electrónico (**Figura 33**) en el que se instaló una resistencia variable (0-10k Ω) con la que se modificó la señal de salida reduciendo el voltaje a la mitad, de forma que se pudieran registrar concentraciones desde 0 hasta 5.000 ppm, y se acopló el cable de salida a un *jack* estéreo de 2,5 mm (**Figura 34**).

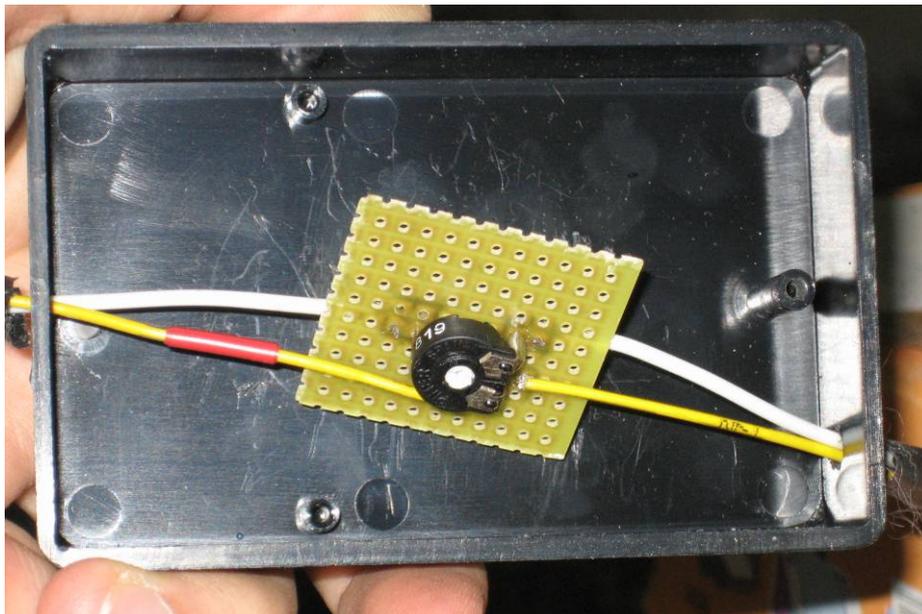


Figura 33. Montaje electrónico para la reducción de voltaje

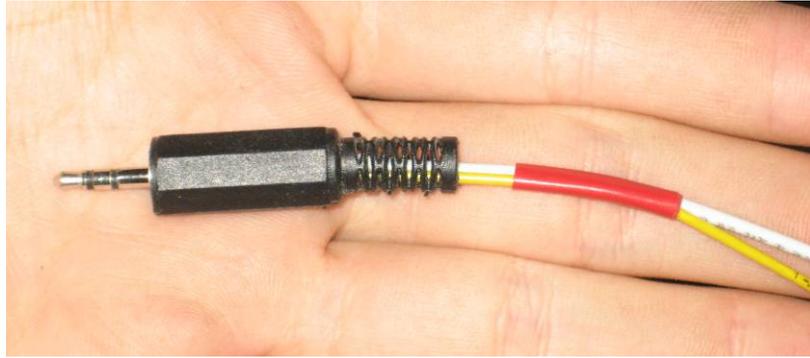


Figura 34. Conexión a jack estéreo

También se introdujo en la cámara un pequeño ventilador que se mantuvo en funcionamiento de forma continua con el fin de homogeneizar el aire. El **Anejo 1** recoge la información técnica relacionada con los materiales utilizados.

Para realizar la determinación se procedió a sellar la cámara (**Figura 31**), y posteriormente se introdujo en la cámara, a través de una sonda, dióxido de carbono, con una pureza del 99% con el fin de aumentar la concentración de dicho gas en el interior. Una vez estabilizada la concentración, se abrió una entrada de aire y se puso en funcionamiento la bomba registrándose en todo momento la concentración de dióxido de carbono. También se registró la concentración de dióxido de carbono en el exterior de la cámara con el fin de obtener unos valores de referencia para conocer la concentración de este gas en el aire de entrada.

Posteriormente se utilizó la ecuación general del balance de masas (**Ecuación 21**) para calcular el caudal de trabajo de las bombas en la cámara.

$$(C_e \times q_e) - (C_s \times q_s) + \frac{dV}{dt} + V \times \frac{dC_i}{dt} = 0 \quad \text{Ecuación 21}$$

Siendo:

- C_e**: Concentración del gas a la entrada (mg/m³).
- C_s**: Concentración del gas a la salida (mg/m³).
- C_i**: Concentración del gas en el interior (mg/m³).
- q_e**: Caudal de entrada (m³/h).
- q_s**: Caudal de salida (m³/h).
- V**: Volumen (m³).

Asumiendo en esta ecuación que los caudales de entrada y salida son iguales, que la concentración en el interior de la cámara es la misma que la concentración a la salida de la misma y que el volumen es constante, el balance queda como sigue (**Ecuación 22**):

$$q = \frac{V}{dt} \times \ln \left(\frac{C_e - C_0}{C_e - C_t} \right) \quad \text{Ecuación 22}$$

Siendo:

- q: Caudal (m³/h).
- C_e: Concentración del gas a la entrada (mg/m³).
- C₀: Concentración del gas inicial (mg/m³).
- C_t: Concentración del gas en el momento *t* (mg/m³).
- V: Volumen (m³).

3.2.3 Cálculo de las emisiones. Balance de dióxido de carbono

3.2.3.1 Fundamentos

Considerando el sistema que constituye la cámara dinámica, se puede realizar un balance de gases en el espacio delimitado por los cerramientos de la misma (**Figura 35**).

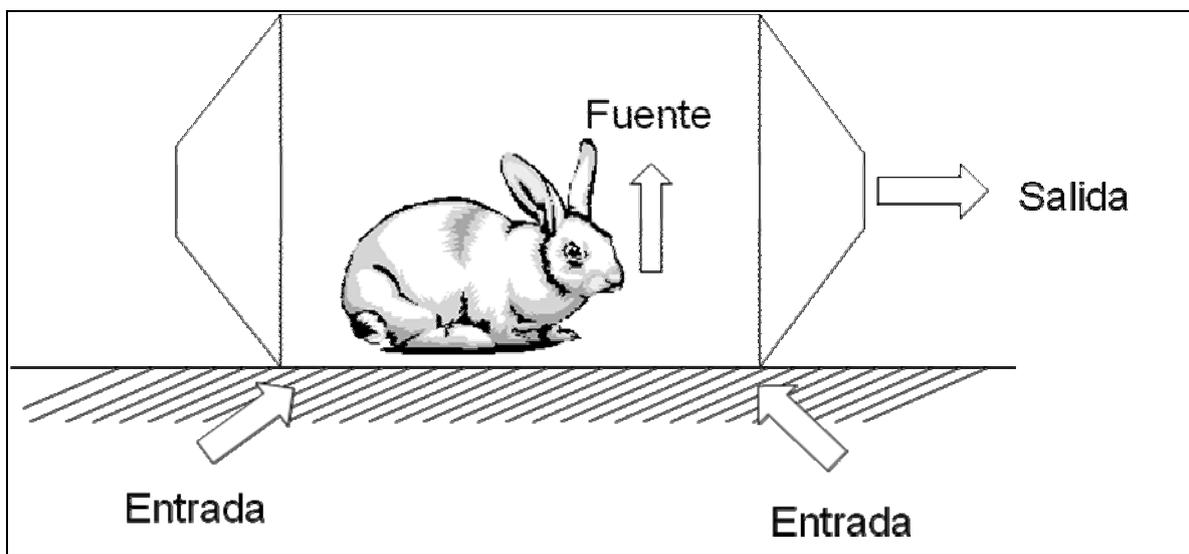


Figura 35. Componentes del balance de gases en la cámara dinámica

En este balance se tendrán las siguientes componentes:

- **Entradas:** CO₂ presente en el aire ambiental a una concentración C_i, que entra en la cámara por las aberturas inferiores
- **Salidas:** CO₂ presente en el aire expulsado desde el interior de la cámara hacia el exterior, a una concentración C_e
- **Fuentes:** CO₂ generado por el animal

El balance, por tanto, queda de la siguiente manera (**Ecuación 23**):

$$\text{Emisiones} = \text{Salidas} - \text{Entradas} \quad \text{Ecuación 23}$$

La aplicación práctica del balance conduce a la **Ecuación 24**:

$$E = \int_{t_0}^{t_1} \left(\frac{(C_{\text{salida}} - C_{\text{entrada}}) \times P \times PM \times \text{Flujo}}{R \times T \times N} \right) dt \quad \text{Ecuación 24}$$

Siendo:

- E:** Emisiones (μg por animal).
- C:** Concentraciones (partes por millón en volumen).
- P:** Presión atmosférica (Pa).
- PM:** Peso molecular del dióxido de carbono (44 g/mol).
- Flujo:** Intercambio de aire con la atmósfera (m^3/s).
- R:** Constante de los gases ideales (8,314 J/K mol).
- T:** Temperatura ($^{\circ}\text{Kelvin}$).
- N:** Número de animales.

El balance se puede realizar para el período de tiempo que se considere oportuno; lo más recomendable es que se realice para períodos cortos de tiempo para obtener un balance más ajustado. La posibilidad de medir en continuo facilita conseguir ese objetivo, de forma que en este trabajo se realizará el balance cada cinco minutos.

3.2.3.2 *Materiales utilizados*

Para la realización del balance de gases se utilizaron diversos materiales, entre los que cabe destacar la propia cámara, el material animal, los materiales utilizados para la determinación de los flujos de aire, el equipo de medición de gases y los sistemas de medida de las condiciones ambientales interiores y exteriores.

3.2.3.2.1 *Instalaciones*

El trabajo se ha realizado en el interior de una nave cebo de conejos perteneciente al Departamento de Ciencia Animal de la Universidad Politécnica de Valencia, ubicada en el Campus de Vera. Dicha localización se escogió por considerarse adecuada para reproducir en la mayor medida posible las condiciones reales a nivel de granja.

La cámara se situó aproximadamente en la zona media de la nave, sobre las jaulas que se encontraron vacías en todo momento. La **Figura 36** muestra la disposición de la cámara y el equipo adjunto en la nave.



Figura 36. Localización de la cámara y el equipo adjunto en la nave

3.2.3.2.2 Cámara dinámica

Tal y como se ha descrito en anteriores epígrafes, se utilizó una cámara de gases dinámica, de metacrilato, equipada con una jaula interior en la que se localizaron un bebedero y un comedero, una bomba de extracción de aire (**Silent-Pump AC-9902**) con dos tubos de salida de 4 mm de diámetro y un pequeño ventilador (**Power Logic PL80S12M**) para homogeneizar el aire interior (**Figura 37**).



Figura 37. Bomba y ventilador instalados en la cámara

En la **Figura 38** se muestra una vista cenital del interior de la cámara, en la que se observa la jaula interior y a la izquierda, el comedero y el bebedero.



Figura 38. Vista cenital del interior de la cámara

3.2.3.2.3 *Material animal*

Se emplearon para el experimento, animales procedentes de la propia nave de cebo. Dichos animales pertenecen a las cuatro líneas seleccionadas por el grupo de Mejora Genética de la UPV: la línea rosa, seleccionada por parámetros de crecimiento, las líneas verde y amarilla seleccionadas por sus aptitudes reproductivas y la línea blanca con animales seleccionados por su longevidad. En la misma nave se encuentran conejos en 5 fases distintas del ciclo, puesto que la reposición se realiza aproximadamente por cuartos de la nave tras el destete semanal.

Los animales empleados fueron seleccionados en función de su edad, de forma completamente aleatoria respecto al sexo y la línea, seleccionando únicamente animales con una semana post-destete. En total fueron seleccionados tres animales, con pesos comprendidos entre los 700 y 980 g de peso vivo.

3.2.3.2.4 *Material utilizado para la medición de las variables ambientales*

Las variables ambientales registradas en el interior y el exterior de la cámara fueron la temperatura y la humedad relativa. Ambas variables se midieron utilizando registradores **HOBO® H08-004-02** que permiten medir y almacenar datos de temperatura, humedad e iluminación, además de un canal adicional utilizado para disponer de una sonda exterior de temperatura.

3.2.3.2.5 *Equipo de medición de gases*

Para registrar las concentraciones de dióxido de carbono, tanto en el interior como en el exterior de la cámara, se utilizó un transmisor **Vaisala CARBOCAP® GMT 222**, con tecnología de absorción infrarroja (NDIR), con una precisión de ± 20 ppm o 2% de la lectura. Se programó para registrar las concentraciones de gas cada minuto en un datalogger **HOBO® H08-004-02**.

3.2.3.3 Metodología empleada

3.2.3.3.1 Manejo

Todos los días al introducir los animales éstos fueron identificados, con el fin no introducir dos veces el mismo animal, se anotaba el número de semanas que llevaba destetado, su peso y el peso del comedero y el bebedero. El día de salida se anotaban de nuevo, el peso del animal, el del comedero y el del bebedero, de forma que se obtuvieron datos acerca del crecimiento de los conejos y el consumo de agua y pienso. Además, al retirar los conejos de la cámara se limpiaron las deyecciones. Los animales permanecieron en el interior de la cámara durante un día, a excepción de uno de ellos que fue retirado tras dos días. Los datos referentes a la concentración de dióxido de carbono y las variables ambientales fueron recogidos diariamente en todos los casos.

3.2.3.3.2 *Medición de las variables ambientales*

La temperatura y humedad relativa se registraron tanto en el interior como en el exterior de la cámara con un intervalo entre datos de cinco minutos. Una de las sondas se localizó en el interior de la cámara, fuera del alcance de los animales (**Figura 39**), mientras que la otra se localizó en el exterior, en la zona inferior de la cámara (**Figura 40**).



Figura 39. Detalle de la localización de la sonda de T^a y HR en el interior de la cámara



Figura 40. Detalle de la localización de la sonda de Tª y HR en el exterior de la cámara

3.2.3.3.3 Medición del flujo de aire

El caudal de aire se determinó a partir de las experiencias previas detalladas en el epígrafe 3.2.2.2.

3.2.3.3.4 Medición de la concentración de dióxido de carbono

La concentración de gas en el interior de la cámara se midió a través de una de las salidas de aire procedente de la bomba interior, haciendo pasar el aire extraído por el sensor infrarrojo de dióxido de carbono **Figura 41**. Se registraron las concentraciones de CO₂ cada minuto.



Figura 41. Detalle de la colocación del sensor de dióxido de carbono

Para determinar la concentración de dióxido de carbono en el exterior de la cámara, se registró en continuo en dos periodos, durante dos días previos al inicio del experimento, y

durante una semana tras finalizar el mismo, localizando el sensor de dióxido de carbono en la zona inferior de la cámara, donde se sitúan las entradas naturales de aire. En este caso, se registraron los valores de concentración cada cinco minutos. Posteriormente se calcularon los valores medios diarios para cada periodo de cinco minutos.

3.2.3.3.5 Cálculo de las emisiones

La tasa de emisión de dióxido de carbono se determinó utilizando la **Ecuación 24** (página 60), para periodos de cinco minutos durante las 24 horas del día. Posteriormente se estandarizaron las emisiones en función del peso metabólico de los animales presentes en cada momento, obteniendo así los valores expresados como mg de CO₂ por hora y por kilogramo de peso metabólico. Una vez estandarizados los valores se calcularon las medias diarias para periodos de cinco minutos y para periodos de una hora.

3.2.3.4 Relación de la temperatura con las emisiones de dióxido de carbono

Según el CIGR (2002) existe una relación de tipo inverso entre las emisiones de dióxido de carbono por parte de los animales y la temperatura ambiental. Así, se propone en el documento anteriormente referenciado una ecuación con la que estandarizar el valor de emisión a una temperatura constante de 20°C (**Ecuación 25**).

$$VCO_2^{20^\circ} = \left[1 + 4 \times 10^{-5} (20 - t)^3\right] \times VCO_2 \quad \text{Ecuación 25}$$

Siendo:

VCO₂^{20°}: Emisiones estandarizadas (mg/h por kg de peso metabólico).

VCO₂: Emisiones calculadas (mg/h por kg de peso metabólico).

t: Temperatura (°C).

De esta forma se calcularon las emisiones de dióxido de carbono estandarizadas a 20°C, con lo que se considera se puede eliminar el efecto de la temperatura sobre los valores calculados.

3.2.4 Calendario del experimento

El calendario de las pruebas que componen este experimento se puede dividir en tres grandes bloques:

- Las primeras pruebas utilizando el equipo como cámara cerrada para determinar la tasa respiratoria de los conejos se realizaron durante la última semana de marzo del año 2007.
- La determinación de los caudales de funcionamiento se llevó a cabo durante la última semana del mes de julio del año 2007.

- El experimento con animales vivos se desarrolló durante las tres primeras semanas del mes de agosto del mismo año (días del 4 al 19), siendo los días 4 y 5, y los días de la semana comprendida entre el día 13 y el día 19 en los que se registraron los valores de dióxido de carbono en el exterior de la cámara.

3.2.5 **Análisis estadístico**

Para realizar el **análisis de la incertidumbre** de las emisiones de gases calculadas se utilizó el método de simulación de Monte Carlo. El principio de dicho análisis es seleccionar valores aleatorios de las variables que intervienen en una ecuación dentro de sus funciones de densidad de probabilidad individuales, calculando posteriormente el valor final de la incógnita.

En este trabajo se calcularon valores aleatorios para las concentraciones medidas y el flujo de ventilación calculado, considerando para cada dato su error estándar que, en este estudio, fue el error de medida de los sistemas empleados. Con estos datos simulados se obtuvo una media y una desviación estándar que es la que se expone en los resultados finales. Los procedimientos aplicados fueron: *NormalValue* para el cálculo de los valores simulados y *SimulationMean* y *SimulationStandardDeviation* para el cálculo de la media y la desviación estándar de dichos valores, del paquete informático *RiskAMP* (Structured Data, 2005).

Por otro lado, la pauta de la **evolución diaria de las emisiones** se a través de un análisis senoidal derivado de las series de *Fourier*. La simplificación del modelo utilizado en el presente trabajo se resume según la **Ecuación 26**:

$$Y(t) = A_0 + A_1 \times \sin(w_1 \cdot t + \varphi_1) + \varepsilon \quad \text{Ecuación 26}$$

Siendo:

- Y(t):** Valor en un tiempo "t" (horas) de la variable respuesta
- A₀:** Valor medio de la variable estudiada
- A₁:** Amplitud
- w₁:** Frecuencia angular = $2\pi/T$ (donde T es el periodo, en este caso de 24 horas, por lo que toma el valor de 0.2618)
- φ₁:** Desfase
- ε:** Error residual

Para estimar todos estos parámetros, se utilizó el procedimiento *NLIN* del paquete estadístico SAS (SAS, 2001) y los valores medios horarios calculados para todo el experimento, de las concentraciones y las emisiones. El coeficiente de regresión (R^2) ajustado, que es igual al porcentaje de varianza explicado por el modelo y la raíz cuadrada del error medio, se utilizó como parámetro de ajuste para las series.

Las **correlaciones** calculadas entre la temperatura y las emisiones de dióxido de carbono se determinaron utilizando el procedimiento *PROC CORR* del paquete estadístico SAS (SAS, 2001).

Los **valores medios** utilizados para presentar los resultados del balance de carbono, así como su **error estándar**, se obtuvieron utilizando el procedimiento *PROC MEANS* del paquete estadístico SAS (SAS, 2001).

3.3 RESULTADOS

3.3.1 Determinación del caudal de trabajo

3.3.1.1 Experimento en cámara cerrada

La **Tabla 5** recoge los datos referentes al peso de los conejos y a la duración de cada una de las tres pruebas realizadas.

| Tabla 5. Peso de los conejos y duración de cada prueba en cámara cerrada | | | |
|---|----------|----------|--------------|
| Prueba | Peso (g) | | Duración (s) |
| | Conejo 1 | Conejo 2 | |
| 1 | 1.870 | 1.670 | 284 |
| 2 | 1.870 | 1.670 | 880 |
| 3 | 1.710 | 1.480 | 1.010 |

En lo que respecta a las condiciones ambientales registradas en el interior de la cámara durante las tres pruebas, la **Figura 42** muestra la evolución de la temperatura. Se observa cómo, en general, las diferencias registradas son muy pequeñas.

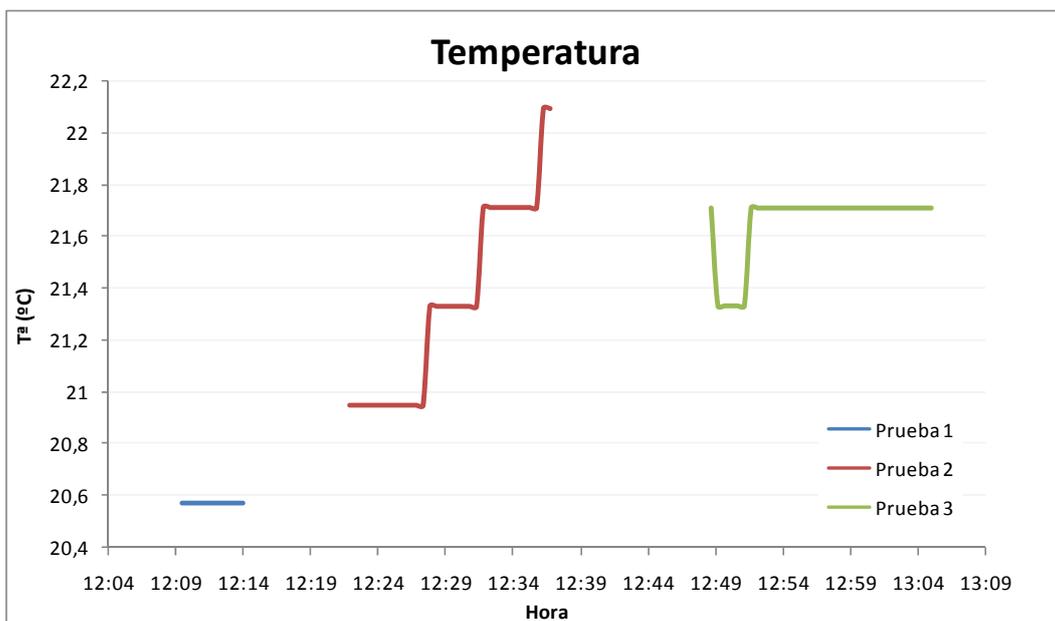


Figura 42. Temperatura registrada en el interior de la cámara cerrada

La **Figura 43** muestra la humedad relativa, en este caso sí que resulta más significativa la variación, aumentando rápidamente al introducir los animales.

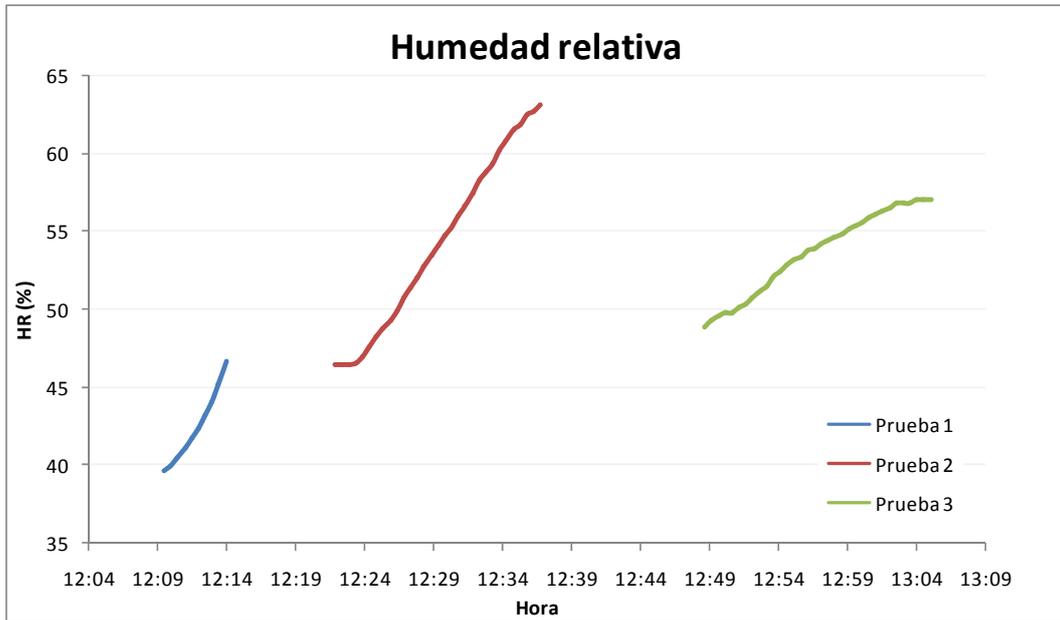


Figura 43. Humedad relativa registrada en la cámara cerrada

Las concentraciones de dióxido de carbono registradas se muestran en la **Figura 44**. Se observa el rápido aumento de la concentración que se produce al introducir los animales.

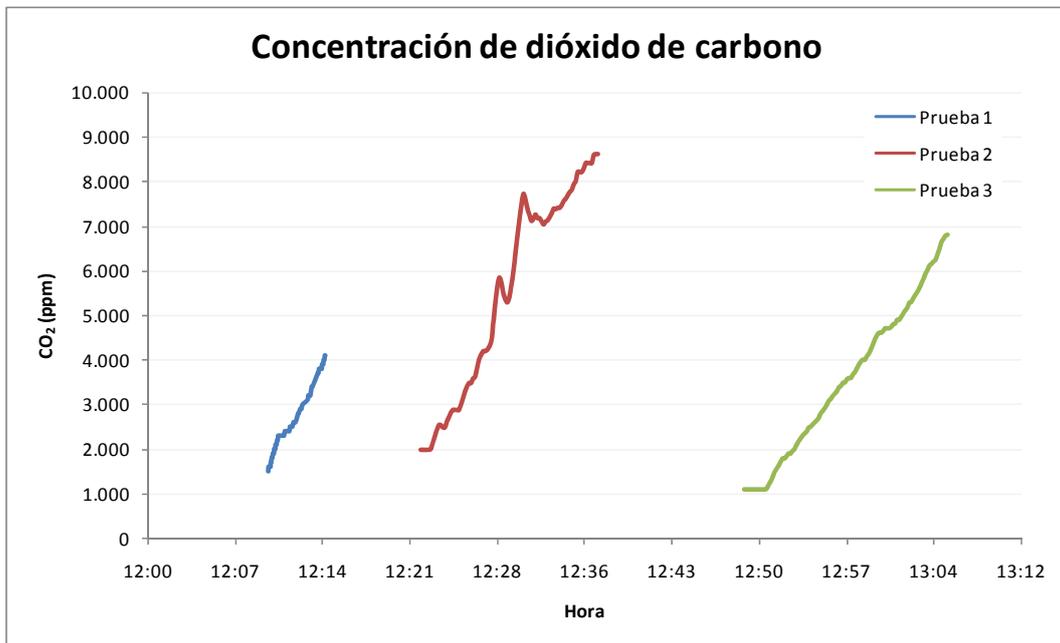


Figura 44. Concentración de dióxido de carbono registrada en la cámara cerrada

Las tasas de emisión de dióxido de carbono, expresadas como litros de CO₂ emitido por kilogramo de peso vivo y por kilogramo de peso metabólico, se presentan en la **Tabla 6**.

Tabla 6. Tasas de emisión de CO₂ de los conejos calculadas en cámara cerrada

| Prueba | CO ₂ inicial (mg) | CO ₂ final (mg) | Producción de gas (l) | Tiempo (h) | P. vivo (kg) | P. metabólico (kg) | Emisión (l/h/kg p.v.) | Emisión (l/h/kg p.m.) |
|--------|------------------------------|----------------------------|-----------------------|------------|--------------|--------------------|-----------------------|-----------------------|
| 1 | 460,09 | 1.257,59 | 0,40 | 0,08 | 3,54 | 3,07 | 1,45 | 1,68 |
| 2 | 613,46 | 2.637,87 | 1,02 | 0,24 | 3,54 | 3,07 | 1,18 | 1,36 |
| 3 | 337,57 | 2.083,74 | 0,88 | 0,28 | 3,19 | 2,84 | 0,99 | 1,11 |

Para CO₂ 1 ppm = 1,799 mg/m³
 Densidad del CO₂ 1,98·10⁶ mg/m³ a 298°K
 Peso metabólico= Peso vivo^{0,75}

De esta forma, los caudales mínimos calculados para cada una de las pruebas aplicando la **Ecuación 20** (página 57) se recogen en la **Tabla 7**.

Tabla 7. Caudales mínimos calculados para cada kg de peso metabólico

| Prueba | Emisión (l/h/kg p.m.) | Caudal (m ³ /h) | Caudal (l/min) |
|--------|-----------------------|----------------------------|----------------|
| 1 | 1,68 | 0,365 | 6,09 |
| 2 | 1,36 | 0,296 | 4,93 |
| 3 | 1,11 | 0,241 | 4,02 |

Así, expresando de forma gráfica los mismos resultados, la **Figura 45** muestra la variación de la concentración esperada en el interior de la cámara con diferentes caudales de ventilación, para un animal con un kilogramo de peso vivo.

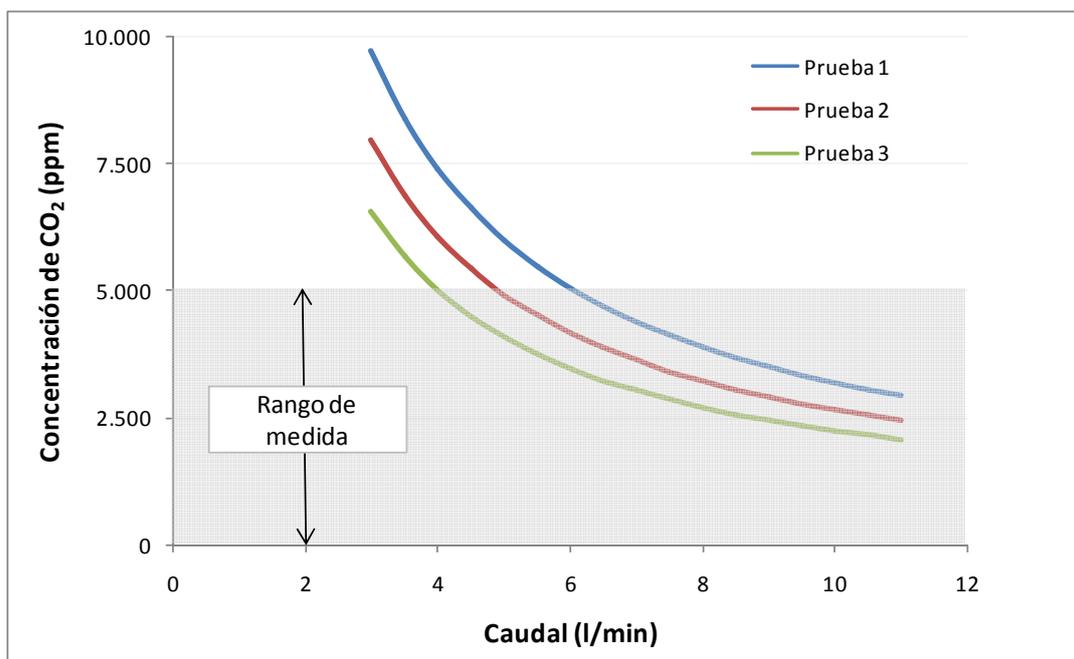


Figura 45. Evolución de la concentración de CO₂ en para diferentes caudales

Tras la observación de estos resultados y considerando la disponibilidad de bombas comerciales, se optó por instalar una bomba con un caudal de **7 litros/minuto**, de forma que la concentración de dióxido de carbono se situara dentro del rango de medida del sensor.

3.3.1.2 Cálculo del caudal de funcionamiento

La concentración media de CO₂ registrada en el exterior de la cámara fue de **463,32±1,45** con una variabilidad bastante reducida, más aún si se considera la precisión del sistema de medida (±20ppm). La **Figura 46** muestra los datos registrados.

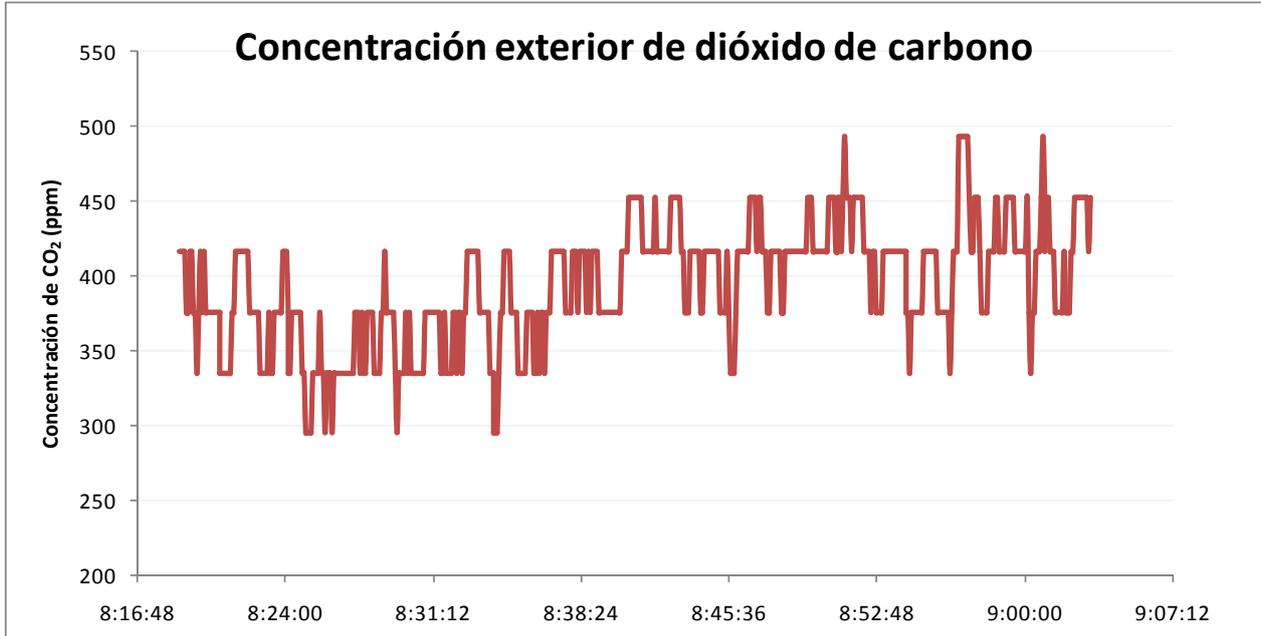


Figura 46. Concentración exterior de CO₂ durante la determinación del caudal

La representación gráfica de los cálculos realizados según la metodología expuesta en el epígrafe 3.2.2.2, se presenta en la **Figura 47** y la **Figura 48** correspondientes a las dos repeticiones de la prueba que se realizaron.

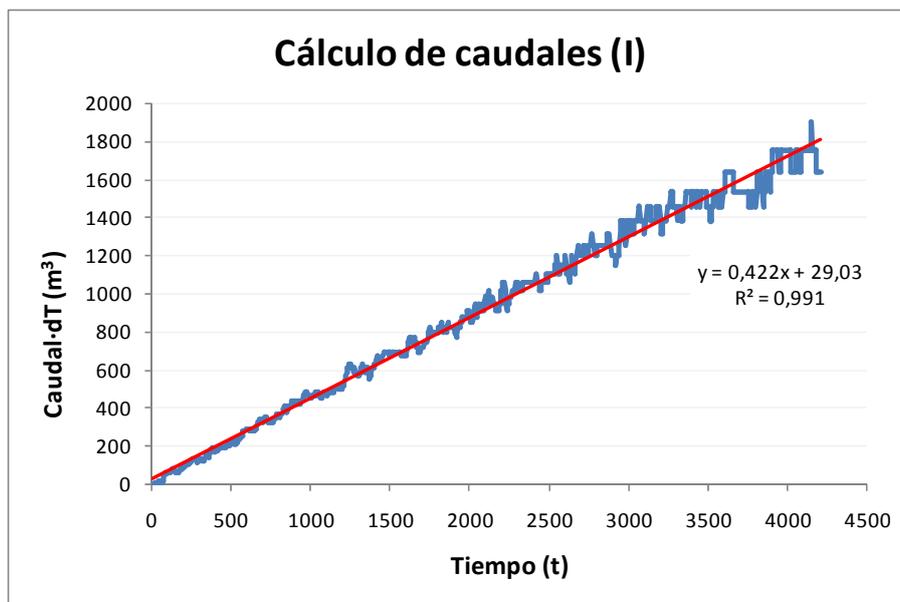


Figura 47. Determinación del caudal de funcionamiento (I)

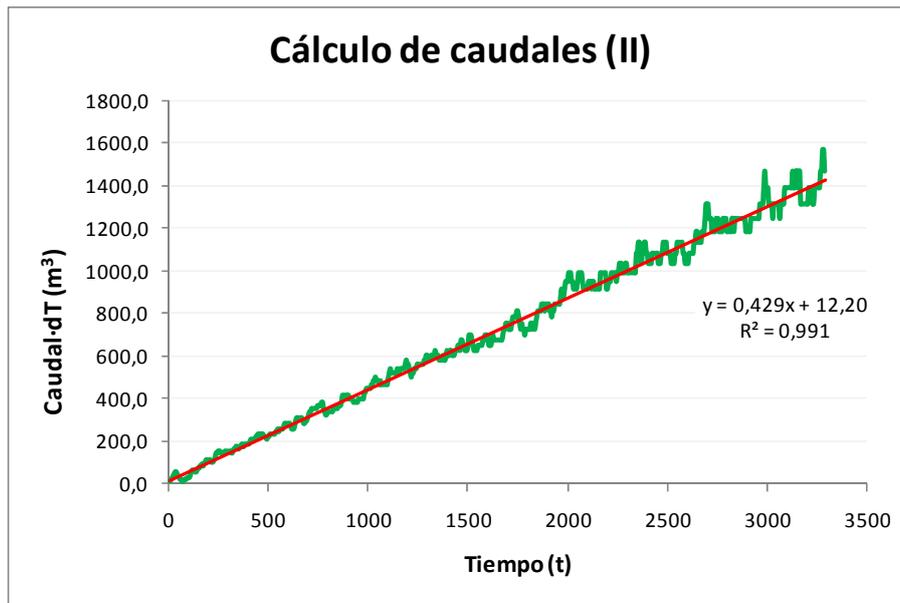


Figura 48. Determinación del caudal de funcionamiento (II)

Así, los caudales de funcionamiento se corresponden con las rectas de ajuste calculadas ($R^2 > 0,99$), y fueron respectivamente de 0,422 y 0,429 m^3/h , lo que expresado en litros por minuto equivale a **7,04** y **7,16 l/min**, ajustándose de forma muy significativa a los valores descritos por el fabricante. Así, para la realización de los cálculos posteriores se tomó como caudal de trabajo la media de estos dos valores: **7,1 l/minuto**.

3.3.2 Cálculo de las emisiones. Balance de dióxido de carbono

3.3.2.1 Crecimiento y consumos

La **Tabla 8** muestra los datos referentes a la edad de los animales, su peso y los consumos de agua y pienso durante el experimento en la cámara dinámica.

| Tabla 8. Crecimiento y consumos de los conejos del experimento en cámara dinámica | | | | | | | |
|--|---------------------------|--------------------|-------------------|---------------------------------|-------------------------------|------------------------|---------------------------|
| Animal (id) | Edad entrada (días) | Entrada (fecha) | Salida (fecha) | Peso _{inicial} (kg) | Peso _{final} (kg) | Consumo agua (L) | Consumo pienso (kg) |
| 55531 | 32 | 6/08/07 | 7/08/07 | 0,980 | 1,040 | 0,220 | 0,080 |
| 56124 | 33 | 7/08/07 | 8/08/07 | 0,700 | 0,760 | 0,120 | 0,070 |
| 55304 | 34 | 8/08/07 | 10/08/07 | 0,780 | 0,860 | 0,180 | 0,150 |

3.3.2.2 Condiciones ambientales

Las temperaturas registradas en el interior y el exterior de la cámara se presentan en la **Figura 49**. Se observa como en el interior las temperaturas fueron ligeramente superiores, a pesar de ser las diferencias bastante reducidas.

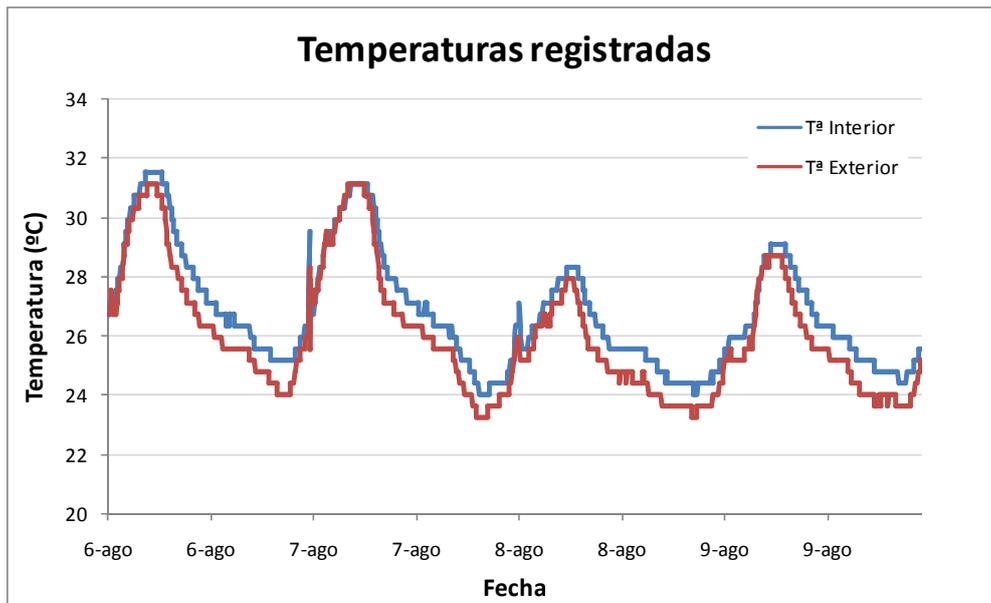


Figura 49. Temperaturas registradas durante el balance de dióxido de carbono

Las humedades relativas registradas se presentan en la **Figura 50**. En este caso, hay que señalar que el sensor localizado en el interior de la cámara tuvo un fallo de funcionamiento a partir del segundo día de medición, de tal forma que se desecharon los datos correspondientes a partir de este momento. Aún así, durante el primer día en el que sí se recogieron los datos interiores y exteriores, sí que se observó que los valores registrados en el interior fueron significativamente superiores a los datos de humedad relativa en el exterior.

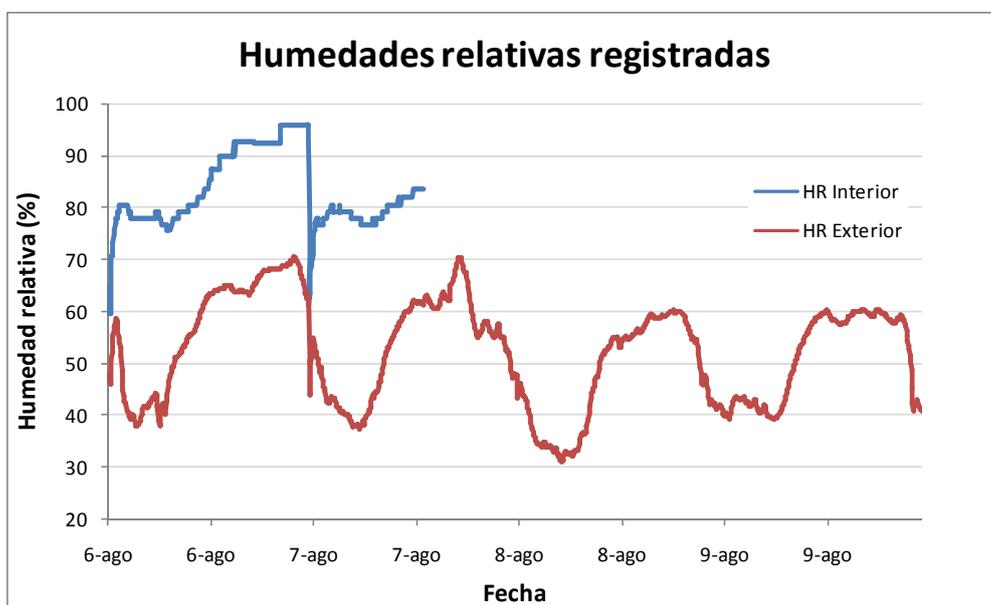


Figura 50. Humedades relativas registradas durante el balance de dióxido de carbono

3.3.2.3 Emisiones de dióxido de carbono

3.3.2.3.1 Concentración de CO₂

La concentración de dióxido de carbono en el exterior de la cámara se situó en torno a 200 y 500 ppm durante los periodos de medición **Figura 51**.

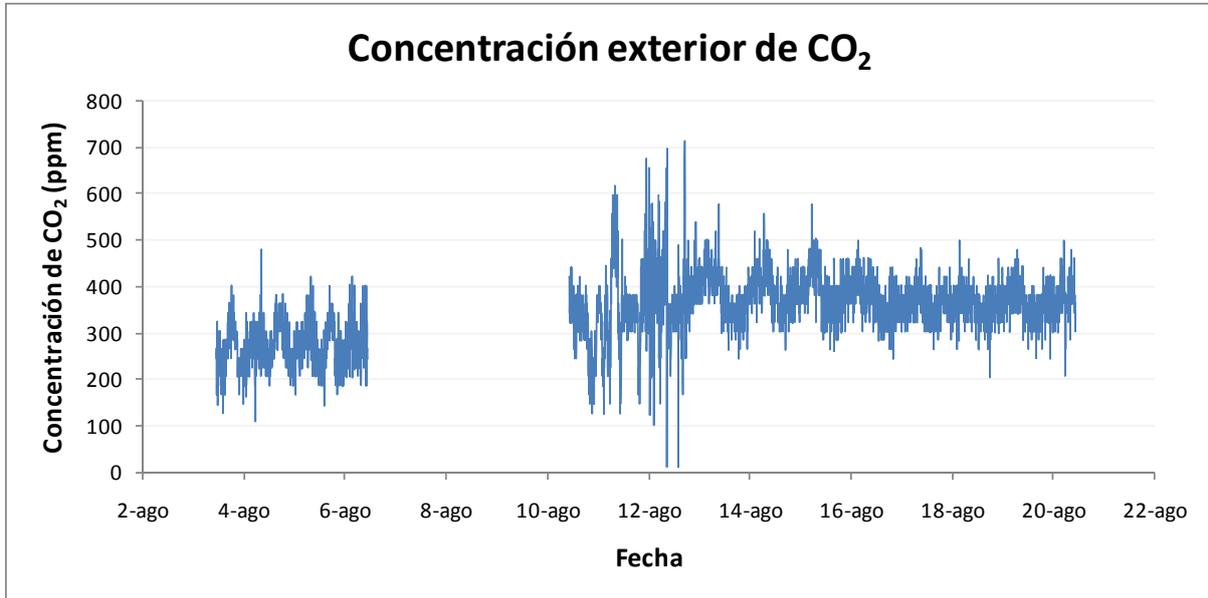


Figura 51. Concentraciones exteriores durante el balance de dióxido de carbono

Se observó una pauta de variación durante el día de dicha concentración, aumentando durante la noche hasta la hora aproximada del amanecer y manteniéndose estable en valores más bajos desde aproximadamente las 10h hasta las 22h la **Figura 52** muestra dicha evolución con los valores calculados cada cinco minutos y las medias horarias.

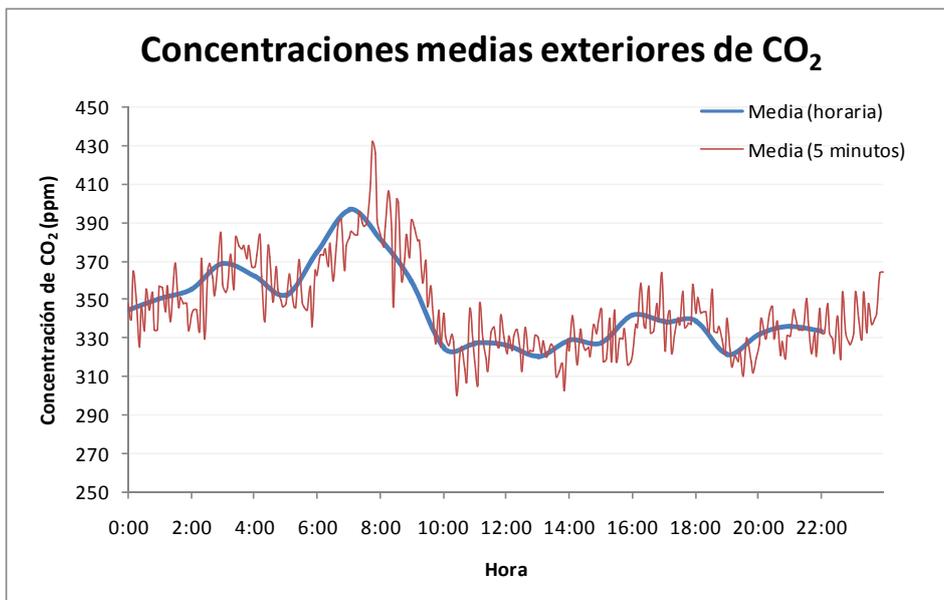


Figura 52. Concentraciones medias exteriores durante el balance de CO₂

En el caso de la concentración de dióxido de carbono en el interior de la cámara, la oscilación observada fue mayor, encontrando valores desde las 1.000 ppm hasta prácticamente 5.000 ppm. En caso de considerar los periodos de adaptación de los animales hasta la estabilización de la concentración de dióxido de carbono (aproximadamente una hora), las concentraciones observadas oscilaron entre 2.500 y 5.000 ppm **Figura 53**.

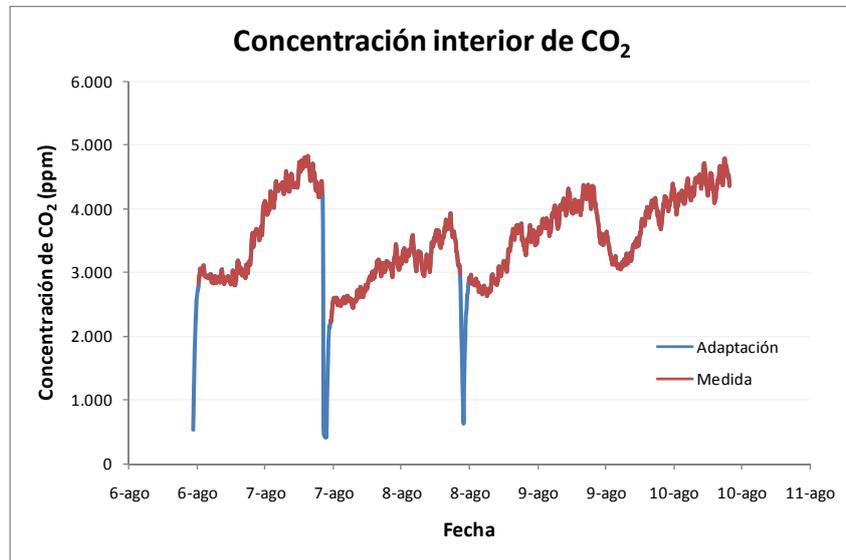


Figura 53. Concentraciones interiores durante el balance de CO₂

3.3.2.3.2 Emisiones calculadas

La **Figura 54** recoge la representación gráfica de las emisiones medias calculadas durante un periodo de 24 horas, corregidas en función del peso metabólico de los animales (mg CO₂/h·kg p.m.). Se observa una línea de color roja en la que se representan las emisiones calculadas como el valor medio cada cinco minutos y en azul las emisiones medias calculadas para cada hora.

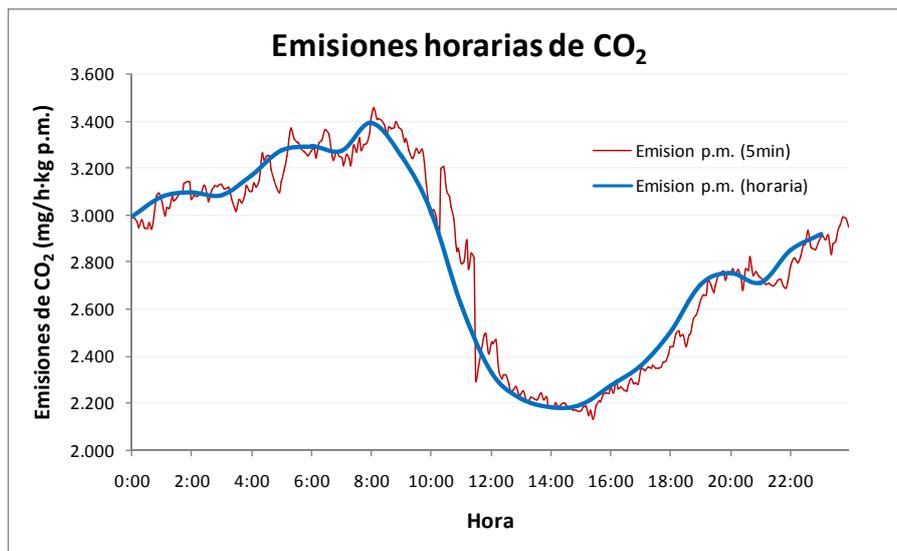


Figura 54. Emisiones de dióxido de carbono medias a lo largo del día

El valor medio calculado para las emisiones de dióxido de carbono fue de **1,42±0,13 l de CO₂/h·kg de p.m.**

En cuanto a la modelización de las emisiones de dióxido de carbono. La **Ecuación 27** presenta el resultado de la regresión realizada. El coeficiente de regresión calculado (R^2) fue de 0,997.

$$Emision\left(mg/m^3\right) = 2.774,5 + 543,3 \times \cos(27,1524 \times Hora - 1,4369) \quad \text{Ecuación 27}$$

La **Figura 55**, por su parte, muestra dicha modelización junto a los datos calculados.

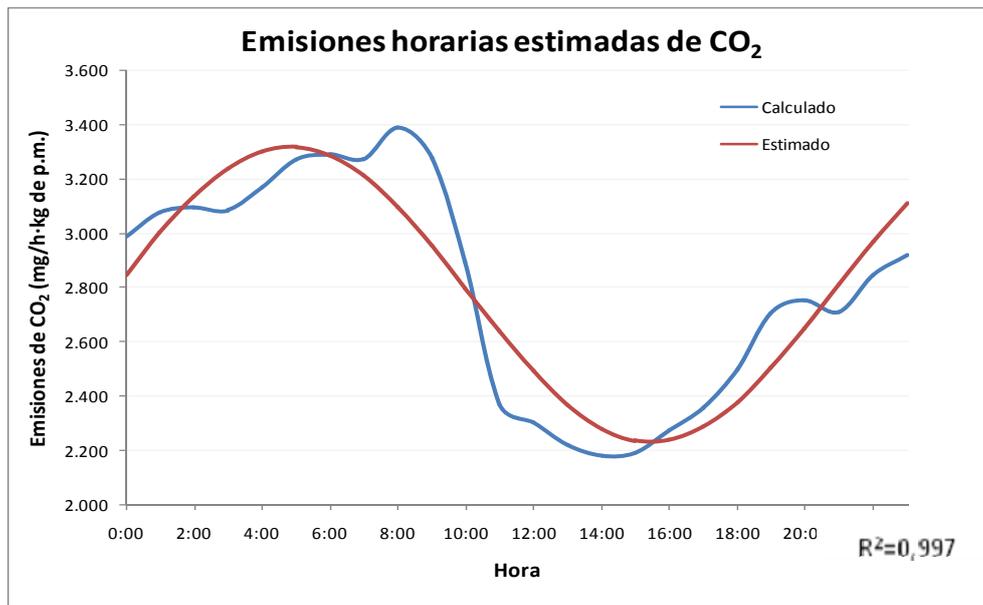


Figura 55. Modelización de las emisiones horarias de CO₂

3.3.3 Relación de las emisiones con la temperatura

La relación existente entre las emisiones (por kg de peso metabólico) calculadas cada cinco minutos y la temperatura registrada en el interior de la cámara se ha cuantificado a través de un análisis de correlación, resultando un coeficiente de correlación de -0,79768, de tal forma que se puede determinar que tal relación existe y además es inversa, es decir, a mayor temperatura se reducen las emisiones y viceversa. Dicha relación se puede observar gráficamente en la **Figura 56**.

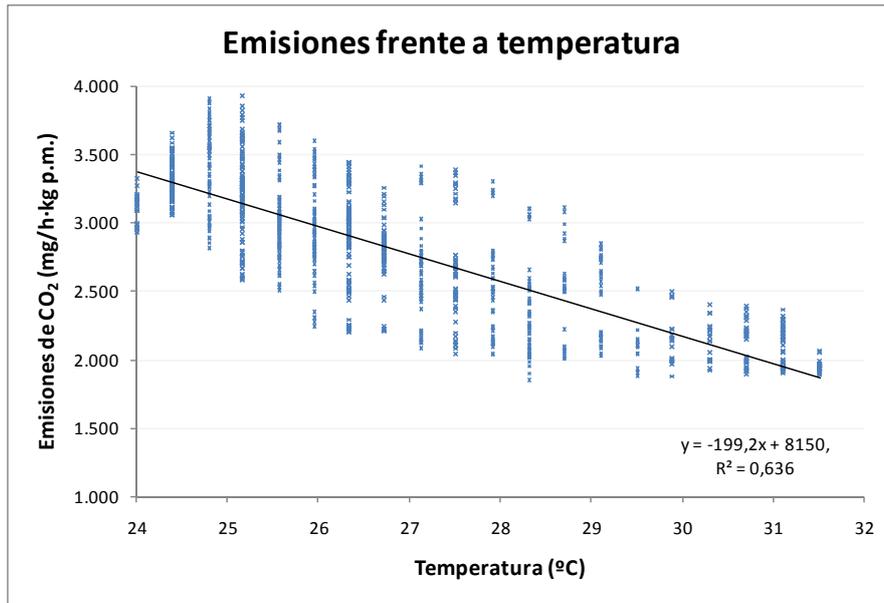


Figura 56. Relación entre las emisiones de CO₂ y la t^a en la cámara dinámica

Siguiendo la metodología recogida en el epígrafe 3.2.3.4, se ha calculado un factor de corrección para las emisiones estimadas en función de la temperatura. Dicho valor corrige las emisiones en muy pequeña medida, oscilando los valores entre 0,94 y 1. La representación gráfica de las emisiones antes y después de la corrección, así como del factor de corrección calculado se presenta en la **Figura 57**.

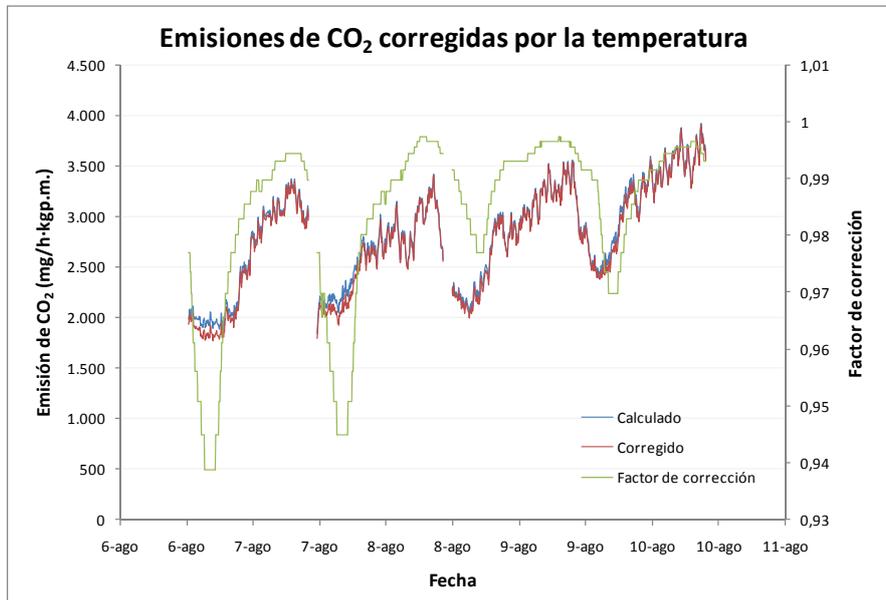


Figura 57. Emisiones de dióxido de carbono corregidas por t^a

3.4 DISCUSIÓN

3.4.1 Metodología empleada

La metodología empleada para el cálculo de las emisiones en el presente trabajo ha sido tradicionalmente utilizada en múltiples trabajos en los que se estudian variables metabólicas y producción de gases por parte de animales vivos (Ebeling y Corey, 1930), y así actualmente sigue siendo el método de referencia para realizar estas determinaciones (Selman *et al.*, 2001; Wang y Huang, 2005; White y Seymour, 2003). Esto es debido a que se trata de una de las formas más precisas y fiables para el cálculo de dichas variables a nivel del individuo, aunque ciertamente, se trata de un espacio cerrado en el que pueden verse afectadas las condiciones ambientales y el comportamiento de los animales, influyendo así sobre las emisiones del mismo.

Por otro lado, cabe destacar que el empleo de la estadística convencional no parece aplicable en este trabajo, debido al diseño experimental planteado, según el cual no se pretende realizar una comparación entre tratamientos, sino que el objetivo es realizar una primera aproximación al estado general de la cuestión abordada. Por ello, se ha considerado interesante emplear por un lado el estudio de la incertidumbre para los resultados de las emisiones, tal y como recomienda el IPCC (2000), y por otro lado la aplicación de un modelo de regresión no lineal para estimar el comportamiento diario de las concentraciones y las emisiones.

3.4.2 Emisiones de dióxido de carbono

Las emisiones de dióxido de carbono procedentes de conejos no se han encontrado otras referencias bibliográficas con las que comparar los resultados obtenidos en el presente trabajo. Tal y como se comentó en el apartado 3.1.1.1 las únicas determinaciones que se han realizado sobre la producción de CO₂ en los conejos se refieren a la respiración, sin considerar las emisiones procedentes de la descomposición del estiércol. En estos trabajos las producciones de CO₂ propuestas fueron de 0,355 l/h/Kg de p.v. (Villagrà *et al.*, 2004), 0,60 l/h/Kg de p.v. (Kiwull-Schone *et al.*, 2001), 0,66 l/h/Kg de p.v. (Kiwull-Schone *et al.*, 2005) y 0,80 l/h/Kg de p.v. (CIGR, 2002), mientras que en el presente estudio, las emisiones calculadas fueron de 1,48 l/h/Kg de p.v., considerando un peso medio de los animales de 850 g.

Hay que considerar que tanto en el primer trabajo como en el último, los valores proporcionados se basan en estimaciones teóricas, no medidas, pudiendo radicar en este punto la diferencia en los resultados. Por otro lado, las emisiones calculadas por Kiwull-Schone *et al.* (2001, 2005) se determinaron durante un periodo de únicamente 25 minutos, y en el presente trabajo se ha podido observar que los animales necesitan de un periodo de adaptación a la

cámara durante el cual es menor la producción de gas. Dicho periodo es superior a estos 25 minutos y se sitúa en torno a la hora.

3.5 IMPLICACIONES DE FUTURO

Tras los resultados obtenidos en este trabajo, y considerando las dificultades que se han abordado durante el desarrollo del mismo, se han podido plantear una serie de cuestiones a tener en cuenta en próximos estudios con conejos de cebo:

- La observación de la actividad de los animales durante la realización del experimento parece una cuestión realmente interesante, de tal forma que se recomienda la instalación de un sistema de grabación durante el estudio
- Los caudales proporcionados por las bombas pueden verse ligeramente alterados con el transcurso del tiempo a causa de las posibles obstrucciones, de tal forma que se recomienda llevar a cabo un control del caudal, al menos una vez por semana y realizar un mantenimiento de las bombas
- Además, el caudal proporcionado por una única bomba parece insuficiente, por lo que se plantea ampliar dicho caudal instalando una segunda bomba de las mismas características
- Tras la observación de los datos, parece ser que el momento del día con mayor estabilidad en la emisión de CO₂, se produce en un intervalo comprendido entre las 10 y las 12h, de tal forma que se propone realizar los cambios de animal en dicho intervalo de tiempo
- Considerando que el ciclo productivo de los conejos de cebo dura cinco semanas, se recomienda realizar las evaluaciones durante un periodo de dicha duración, con animales de todas las edades

4 CONCLUSIONES

Tras la realización del trabajo y el estudio de los resultados obtenidos se pueden presentar las siguientes conclusiones:

- Se ha diseñado una cámara dinámica para el registro de las emisiones de gases cumpliendo con las necesidades consideradas
- Se ha abordado la puesta en marcha de la cámara dinámica con la determinación de la producción de dióxido de carbono por parte de conejos de cebo
- Se han obtenido unos valores preliminares acerca de la producción de dióxido de carbono por parte de los conejos, que se encuentran alrededor de 1,42 l/h/kg de peso metabólico, que pueden servir como base de trabajo para posteriores estudios
- En definitiva, se ha diseñado un equipo y se ha puesto en marcha una metodología para el registro de emisiones procedentes de estiércoles y pequeños animales

5 **BIBLIOGRAFÍA**

- Aarnink, A. J. A., Keen, A., Metz, J. H. M., Speelman, L., y Verstegen, M. W. A. (1995). Ammonia emission patterns during the growing periods of pig housed on partially slatted floors. *Journal of Agriculture Engineering Research* 62, 105-116.
- Aarnink, A. J. A., Swierstra, D., Van den Berg, y Speelman, L. (1997). Effect of type of slatted floor and degree of fouling of solid floor on ammonia emission rates from fattening piggeries. *Journal of Agriculture Engineering Research* 66, 93-102.
- Aarnink, A. J. A., Van den Berg, Keen, A., Hoeksma, P., y Verstegen, M. W. A. (1996). Effect of slatted floor area on ammonia emission and on the excretory and lying behaviour of growing pigs. *Journal of Agriculture Engineering Research* 64, 299-310.
- Amon, B., Amon, Th., Boxberger, J., y Alt, Ch. (2001). Emissions of NH₃, N₂O and CH₄ from dairy cows housed in a farmyard manure tying stall (housing, manure storage, manure spreading). *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 60, 103-113.
- Amon, B., Kryvoruchko, V., Amon, T., y Zechmeister-Boltenstern, S. (2006). Methane, nitrous oxide and ammonia emissions during storage and after application of dairy cattle slurry and influence of slurry treatment. *Agriculture Ecosystems & Environment* 112(2-3), 153-162.
- Amon, B., Kryvoruchko, V., Fröhlich, M., y Amon, T. (2005). *Ammonia, nitrous oxide, methane and VOC emissions during storage of pig slurry and pig farmyard manure and influence of the additive "Effective Microorganisms (EM)"*. University of Natural Resources and Applied Life Sciences, pp. 1-28. Wien.
- Arogo, J., Westerman, P. W., y Liang, Z. S. (2003). Comparing ammonium ion dissociation constant in swine anaerobic lagoon liquid and deionized water. *Transactions of the ASAE* 46(5), 1415-1419.
- Barthelmie, R. J. y Pryor, S. C. (1998). Implications of ammonia emissions for fine aerosol formation and visibility impairment - A case study from the Lower Fraser Valley, British Columbia. *Atmospheric environment* 32(3), 345-352.
- Beline, F., Martinez, J., Marol, C., y Guiraud, G. (1998). Nitrogen transformations during anaerobically stored N-15-labelled pig slurry. *Bioresource Technology* 64(2), 83-88.
- Blake, D. R. y Rowland, F. S. (1988). Continuing Worldwide Increase in Tropospheric Methane, 1978 to 1987. *Science* 239(4844), 1129-1131.
- Blanes, V. y Pedersen, S. (2005). Ventilation flow in pig houses measured and calculated by carbon dioxide, moisture and heat balance equations. *Biosystems Engineering* 92(4), 483-493.
- Blanes-Vidal, V., Topper, P. A., y Wheeler, E. F. (2007). Validation of ammonia emissions from dairy cow manure estimated with a non-steady-state, recirculation flux chamber with whole-building emissions. *Transactions of the ASABE* 50(2), 633-640.
- Boriack, C. K. (2005). Design and performance of an ammonia measurement system. 1-113. Texas A&M University.

- Brewer, S. K. y Costello, T. A. (1999). In situ measurement of ammonia volatilization from broiler litter using an enclosed air chamber. *Transactions of the ASAE* 42(5), 1415-1422.
- Budavari, S. (2001). *The Merck Index: an encyclopedia of chemicals, drugs and biologicals*. Editors: O'Neal, M. J., Smith, A., y Heckelman, P. E. 13, Merck & CO., Inc.,.
- Burkhardt, J., Sutton, M. A., Milford, C., Storeton-west, R. L., y Fowler, D. (1998). Ammonia concentrations at a site in Southern Scotland from 2 yr of continuous measurements. *Atmospheric environment* 32(3), 325-331.
- Canh, T. T., Aarnink, A. J. A., Schutte, J. B., Sutton, A., Langhout, D. J., y Verstegen, M. W. A. (1998a). Dietary protein affects nitrogen excretion and ammonia emission from slurry of growing-finishing pigs. *Livestock Production Science* 56(3), 181-191.
- Canh, T. T., Aarnink, A. J. A., Verstegen, M. W. A., y Schrama, J. W. (1998b). Influence of dietary factors on the pH and ammonia emission of slurry from growing-finishing pigs. *Journal of Animal Science* 76(4), 1123-1130.
- Chadwick, D. R. (2005). Emissions of ammonia, nitrous oxide and methane from cattle manure heaps: effect of compaction and covering. *Atmospheric environment* 39(4), 787-799.
- Childers, J. W., Thompson, E. L., Harris, D. B., Kirchgessner, D. A., Clayton, M., Natschke, D. F., y Phillips, W. J. (2001). Multi-pollutant concentration measurements around a concentrated swine production facility using open-path FTIR spectrometry. *Atmospheric environment* 35, 1923-1936.
- CIGR. (2002). *Climatization of animal houses. Heat and moisture production at animal and house levels*. Pedersen, S. y Sälvik, K. Danish Institute of Agricultural Sciences, pp. 1-46. Horsens, Denmark.
- Clemens, J., Trimborn, M., Weiland, P., y Amon, B. (2006). Mitigation of greenhouse gas emissions by anaerobic digestion of cattle slurry. *Agriculture Ecosystems & Environment* 112(2-3), 171-177.
- Crutzen, P. J. y Lelieveld, J. (2001). Human impacts on atmospheric chemistry. *ANNUAL REVIEW OF EARTH AND PLANETARY SCIENCES* 29, 17-45.
- Demmers, T. G. M., Burgess, L. R., Short, J. L., Philips, V. R., Clark, J. A., y Wathes, C. M. (1999). Ammonia emissions from two mechanically ventilated UK livestock buildings. *Atmospheric environment* 33(2), 217-227.
- Demmers, T. G. M., Wathes, C. M., Richards, P. A., Teer, N., Taylor, L. L., Bland, V., Goodman, J., Armstrong, D., Chennells, D., Done, S. H., y Hartung, J. (2003). A facility for controlled exposure of pigs to airborne dusts and gases. *Biosystems Engineering* 84(2), 217-230.
- Ebeling, A. H. y Corey, R. B. (1930). An apparatus for the study of respiratory quotient and basal metabolism of mice. *Journal of Experimental Medicine* 51(1), 41-50.
- Ellis, S., Webb, J., Misselbrook, T. H., y Chadwick, D. R. (2001). Emission of ammonia (NH₃), nitrous oxide (N₂O) and methane (CH₄) from a dairy hardstanding in the UK. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 60, 115-122.
- EPA. (1995). *Compilation of air pollutant emission factors. Vol. I: Stationary point and area sources*. 5, U.S. Environmental Protection Agency, . Research Triangle Park, N.C.

- EPA. (1997). *Procedures for preparing emission factor documents.*, United States Environmental Protection Agency,.
- Estellés, F. (2006). *Estudio sobre el balance de carbono y las emisiones de dióxido de carbono y metano en una granja de conejos. Trabajo fin de carrera.* ETSI Agrónomos. Universidad Politécnica de Valencia.
- European Environment Agency. (2001). Agriculture. En: *Joint EMEP/CORINAIR Atmospheric Emission Inventory Guidebook*. Capítulo 10, Pag. 1-130. Copenhagen.
- Flotats, X., Illa, J., Magrí, A., Palats, J., Solé, F., y Campos, E. (2004). *Guia dels tractaments de les dejeccions ramaderes.* Generalitat de Catalunya departament de Medi Ambient, Generalitat de Catalunya departament d'Agricultura, Ramaderia i Pesca, IRTA.
- Fowler, D., Flechard, C. R., Sutton, M. A., y Storeton-west, R. L. (1998a). Long term measurements of the land-atmosphere exchange of ammonia over moorland. *Atmospheric environment* 32(3), 453-459.
- Fowler, D., Pitcairn, C. E. R., Sutton, M. A., Flechard, C., Loubet, B., Coyle, M., y Munro, R. C. (1998b). The mass budget of atmospheric ammonia in woodland within 1 km of livestock buildings. *Environmental Pollution* 102, 343-348.
- Fukumoto, Y., Osada, T., Hanajima, D., y Haga, K. (2003). Patterns and quantities of NH₃, N₂O and CH₄ emissions during swine manure composting without forced aeration-effect of compost pile scale. *Bioresource Technology* 89, 109-114.
- Gates, R. S., Xin, H., Casey, K. D., Liang, Y., y Wheeler, E. F. (2006). Method for measuring ammonia emissions from poultry houses. *Journal of Applied Poultry Research* 14(3), 622-634.
- Gonzalez-Avalos, E. y Ruiz-Suarez, L. G. (2001). Methane emission factors from cattle manure in Mexico. *Bioresource Technology* 80(1), 63-71.
- Grace, J. (2004). Understanding and managing the global carbon cycle. *Journal of Ecology* 92(2), 189-202.
- Greatorex, J. M. (2000). A review of methods for measuring methane, nitrous oxide and odour emissions from animal production activities. 1-27. JTI - Institutet för jordbruks- och miljöteknik.
- Groenestein, C. M., Hendriks, M. M. W. B., y den Hartog, L. A. (2003). Effect of feeding schedule on ammonia emission from individual and group-housing systems for sows. *Biosystems Engineering* 85(1), 79-85.
- Groot Koerkamp, P. W. G. y Bleijenberg, R. (1998). Effect of type of aviary, manure and litter handling on the emission kinetics of ammonia from layer houses. *British Poultry Science* 39, 379-392.
- Guiziou, F. y Béline, F. (2005). In situ measurement of ammonia and greenhouse gas emissions from broiler houses in France. *Bioresource Technology* 96, 203-207.
- Haeussermann, A., Hartung, E., Gallmann, E., y Jungbluth, T. (2006). Influence of season, ventilation strategy, and slurry removal on methane emissions from pig houses. *Agriculture Ecosystems & Environment* 112(2-3), 115-121.

- Hansen, B., Nornberg, P., y Rasmussen, K. R. (1998). Atmospheric ammonia exchange on a heathland in Denmark. *Atmospheric environment* 32(3), 461-464.
- Hansen, M. N., Sommer, S. G., y Madsen, N. P. (2003). Reduction of ammonia emission by shallow slurry injection: injection efficiency and additional energy demand. *Journal of Environmental Quality* 32, 1099-1104.
- Harris, D. B., Shores, R. C., and Jones, L. G. (2002). Ammonia emission factors from swine finishing operations. 1-6.
- Heber, A. J., Ni, J. Q., Haymore, B. L., Duggirala, R. K., y Keener, K. M. (2001). Air quality and emission measurement methodology at swine finishing buildings. *Transactions of the ASAE* 44(6), 1765-1778.
- Heber, A. J., Ni, J. Q., y Lim, T. T. (2002). Odor flux measurements at a facultative swine lagoon stratified by surface aeration. *Applied Engineering in Agriculture* 18(5), 593-602.
- Hellebrand, H. J. y Kalk, W. T. (2001). Emissions of methane, nitrous oxide and ammonia from dung windrows. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 60, 83-87.
- Horvath, L. y Sutton, M. A. (1998). Long-term record of ammonia and ammonium concentrations at K-puszta, Hungary. *Atmospheric environment* 32(3), 339-344.
- Houweling, S. (1999). Global modeling of atmospheric methane sources and sinks. Utrecht University.
- Hovmand, M. F., Andersen, H. V., Lofstrom, P., Ahleson, H., y Jensen, N. O. (1998). Measurements of the horizontal gradient of ammonia over a conifer forest in Denmark. *Atmospheric environment* 32(3), 423-429.
- Huijsmans, J. F. M., Hol, J. M. G., y Vermeulen, G. D. (2003). Effect of application method, manure characteristics, weather and field conditions on ammonia volatilization from manure applied to arable land. *Atmospheric environment* 37, 3669-3680.
- IPCC. (2001a). *Cambio climático 2001: Informe de síntesis. Resumen para responsables de políticas.*, IPCC,.
- IPCC. (2001b). *Climate Change 2001: The Scientific Basis.* Editors: Houghton, J. T., Ding, Y., Griggs, D. J., Noguera, M., van der Linden, P. J., y Xiaosu, D. Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Ginebra, Suiza, pp. 1-944.
- IPCC. (2007). *IPCC fourth assessment report. Technical summary.* pp. 1-74.
- Jambert, C., Serça, D., y Delmas, R. (1997). Quantification of N-losses as NH₃, NO, and N₂O and N₂ from fertilized maize fields in southwestern France. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 48, 91-104.
- Jensen, A. O. (2002). Changing the environment in swine buildings using sulfuric acid. *Transactions of the ASAE* 45(1), 223-227.
- Jepperson, K. H. (1999). Volatilization of ammonia in deep-litter systems with different bedding materials for young cattle. *Journal of Agricultural Engineering Research* 73(1), 49-57.
- Jiang, J. K. y Sands, J. R. (2000). *Odour and ammonia emission from broiler farms.* 00/2, Rural Industries Research and Development Corporation, pp. 1-107. Kingsinton, Australia.

- Jongebreur, A. A., Monteny, G. J., y Ogink, N. W. M. (2005). Livestock production and emissions of volatile gases. Edición: Kuczynsky, T., Dämmgen, U., Webb, J., y Myczko, A. En: *Emissions from European agriculture*. Capítulo 1. Wageningen Academic Publishers.
- Khalil, M. A. K. y Rasmussen, R. A. (1990). Atmospheric Methane - Recent Global Trends. *Environmental Science & Technology* 24(4), 549-553.
- Kiwull-Schöne, H., Kalhoff, H., Manz, F., Diekmann, L., y Kiwull, P. (2001). Minimal-invasive approach to study pulmonary, metabolic and renal responses to alimentary acid-base changes in conscious rabbits. *European Journal of Nutrition* 40(5), 255-259.
- Kiwull-Schöne, H., Kalhoff, H., Manz, F., y Kiwull, P. (2005). Food mineral composition and acid-base balance in rabbits. *European Journal of Nutrition* 44(8), 499-508.
- Koerkamp, P. W. G. 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., Schroder, M., Linkert, K. H., Pedersen, S., Takai, H., Johnsen, J. O., y Wathes, C. M. (1998). Concentrations and emissions of ammonia in livestock buildings in Northern Europe. *Journal of Agricultural Engineering Research* 70(1), 79-95.
- Kormann, R., Fischer, H., Gurk, C., Helleis, F., Klüpfel, Th., Kowalski, K., Königstedt, R., Parchakta, U., y Wagner, V. (2002). Application of a multi-laser tunable diode laser absorption spectrometer for atmospheric trace gas measurements at sub-ppbv levels. *Spectrochimica Acta Part A* 58, 2489-2498.
- Krupa, S. V. (2003). Effects of atmospheric ammonia (NH₃) on terrestrial vegetation: a review. *Environmental Pollution* 124, 179-221.
- Lacey, R. E., Redwine, J. S., y Parnell, C. B. (2003). Particulate matter and ammonia emission factors for tunnel-ventilated broiler production houses in the Southern U.S. *Transactions of the ASAE* 46(4), 1203-1214.
- Lague, C., Gaudet, E., Agnew, J., y Fonstad, T. A. (2005). Greenhouse gas emissions from liquid swine manure storage facilities in Saskatchewan. *Transactions of the ASAE* 48(6), 2289-2296.
- Langer, P. (2002). The digestive tract and life history of small mammals. *MAMMAL REVIEW* 32(2), 107-131.
- Larsson, L., Ferm, M., Kasimir-Klemedtsson, A., y Klemedtsson, L. (1998). Ammonia and nitrous oxide emissions from grass and alfalfa mulches. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 51, 41-46.
- Lee, D. S., Halliwell, C., Garland, J. A., Dollard, G. J., y Kingdon, R. D. (1998). Exchange of ammonia at the sea surface--a preliminary study. *Atmospheric environment* 32(3), 431-439.
- Lelieveld, J. y Crutzen, P. J. (1992). Indirect Chemical Effects of Methane on Climate Warming. *Nature* 355(6358), 339-342.
- Lelieveld, J., Crutzen, P. J., y Dentener, F. J. (1998). Changing concentration, lifetime and climate forcing of atmospheric methane. *Tellus Series B-Chemical and Physical Meteorology* 50(2), 128-150.

- Leyris, C., Guillot, J. M., Fanlo, J. L., y Pourtier, L. (2005). Comparison and development of dynamic flux chambers to determine odorous compound emission. rates from area sources. *Chemosphere* 59(3), 415-421.
- Liang, Y., Xin, H., Tanaka, A., Lee, S. H., Li, H., Wheeler, E. F., Gates, R. S., Zajackowski, J. S., Topper, P., and Casey, K. D. (2003). Ammonia emissions from layer houses in Iowa. International Symposium on Gaseous and Odour emissions from animal production facilities, 1-9. Horsens, Denmark.
- Lim, T. T., Heber, A. J., Ni, J. Q., Sutton, A. L., y Shao, P. (2003). Odor and gas release from anaerobic treatment lagoons for swine manure. *Journal of Environmental Quality* 32(2), 406-416.
- Mackenzie, F. T. (1999). *Global Biogeochemical Cycles and the Physical Climate System.*, University Corporation for Atmospheric Research,. pp. 1-76.
- Malgeryd, J. (1998). Technical measures to reduce ammonia losses after spreading of animal manure. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 51, 51-57.
- Mangino, J., Bartram, D., y Brazy, A. (2001). *Development of a Methane Conversion Factor to Estimate Emissions from Animal Waste Lagoons.* Environmental Protection Agency, pp. 1-14.
- Mattila, P. K. (1998). Ammonia volatilization from cattle slurry applied to grassland as affected by slurry treatment and application technique - first year results. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 51, 47-50.
- McGinn, S. M., Beauchemin, K. A., Coates, T., y Colombatto, D. (2004). Methane emissions from beef cattle: Effects of monensin, sunflower oil, enzymes, yeast, and fumaric acid. *Journal of Animal Science* 82(11), 3346-3356.
- McGinn, S. M., Beauchemin, K. A., Iwaasa, A. D., y McAllister, T. A. (2006). Assessment of the Sulfur Hexafluoride (SF6) Tracer Technique for Measuring Enteric Methane Emissions from Cattle [electronic resource]. *Journal of environmental quality.* 35(5), 1686-1691.
- McGinn, S. M., Janzen, H. H., y Coates, T. (2003). Atmospheric ammonia, volatile fatty acids, and other odorants near beef feedlots. *Journal of Environmental Quality* 32, 1173-1182.
- Mcqueen, D. H. (1979). Acoustical Theory of the Photoacoustic Effect in Gaseous and Liquid-Media. *Journal of Physics D-Applied Physics* 12(10), 1673-1678.
- Miles, D. M., Owens, P. R., y Rowe, D. E. (2006). Spatial variability of litter gaseous flux within a commercial broiler house: Ammonia, nitrous oxide, carbon dioxide, and methane. *Poultry Science* 85(2), 167-172.
- Millán, M. M. (2002). Otros gases de efecto invernadero, ozono troposférico y sus consecuencias. Edición: Universidad Politécnica de Valencia. En: *Escuela medioambiental de verano.* Pag. 21-41. Valencia.
- Miller, D. N. y Woodbury, B. L. (2006). A solid-phase microextraction chamber method for analysis of manure volatiles. *Journal of Environmental Quality* 35(6), 2383-2394.
- Minami, K. (1997). Atmospheric methane and nitrous oxide: sources, sinks and strategies for reducing agricultural emissions. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 49, 203-211.

- Misselbrook, T. H., Chadwick, D. R., Pain, B. F., y Headon, D. M. (1998a). Dietary manipulation as a means of decreasing N losses and methane emissions and improving herbage N uptake following application of pig slurry to grassland. *Journal of Agricultural Science* 130, 183-191.
- Misselbrook, T. H. y Hansen, M. N. (2001). Field evaluation of the equilibrium concentration technique (JTI method) for measuring ammonia emission from land spread manure or fertiliser. *Atmospheric environment* 35, 3761-3768.
- Misselbrook, T. H., Nicholson, F. A., y Chambers, B. J. (2005a). Predicting ammonia losses following the application of livestock manure to land. *Bioresource Technology* 96, 159-168.
- Misselbrook, T. H., Nicholson, F. A., Chambers, B. J., y Johnson, R. A. (2005b). Measuring ammonia emissions from land applied manure: an intercomparison of commonly used samplers and techniques. *Environmental Pollution* 135(3), 389-397.
- Misselbrook, T. H., Pain, B. F., y Headon, D. M. (1998b). Estimates of ammonia emission from dairy cow collecting yards. *Journal of Agriculture Engineering Research* 71, 127-135.
- Misselbrook, T. H., Smith, K. A., Jackson, D. R., y Gilhespy, S. L. (2004). Ammonia emissions from irrigation of dilute pig slurries. *Biosystems Engineering* 89(4), 473-484.
- Misselbrook, T. H., Smith, K. A., Johnson, R. A., y Pain, B. F. (2002). Slurry application techniques to reduce ammonia emissions: Result of some UK field-scale experiments. *Biosystems Engineering* 81(3), 313-321.
- Misselbrook, T. H., Webb, J., Chadwick, D. R., Ellis, S., y Pain, B. F. (2001). Gaseous emissions from outdoor concrete yards used by livestock. *Atmospheric environment* 35, 5331-5338.
- Moller, H. B., Sommer, S. G., y Ahring, B. K. (2004). Biological degradation and greenhouse gas emissions during pre-storage of liquid animal manure. *Journal of Environmental Quality* 33(1), 27-36.
- Monteny, G. J., Bannink, A., y Chadwick, D. (2006). Greenhouse gas abatement strategies for animal husbandry. *Agriculture Ecosystems & Environment* 112(2-3), 163-170.
- Moore, P. A., Daniel, T. C., Edwards, D. R., y Miller, D. M. (1995). Effect of Chemical Amendments on Ammonia Volatilization from Poultry Litter. *Journal of Environmental Quality* 24(2), 293-300.
- Morken, J. y Sakshaug, S. (1998). Direct ground injection of livestock waste slurry to avoid ammonia emission. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 51, 59-63.
- Moseley, P. J., Misselbrook, T. H., Pain, B. F., Earl, R., y Godwin, R. J. (1998). The effect of injector tine design on odour and ammonia emissions following injection of bio-solids into arable cropping. *Journal of Agricultural Engineering Research* 71(4), 385-394.
- Mosquera, J., Hensen, A., van der Bulk, W. C. M., Vermeulen, A. T., Erisman, J. W., y Möls, J. J. (2000). *NH₃ flux measurements at Schagerbrug and Oostvaardersplassen, the Dutch contribution to the Graminae experiment*. ECN-C--00-079, ECN-Clean Fossils Environmental Analysis and Technology, pp. 1-60.

- Moss, A. R., Jouany, J. P., y Newbold, J. (2000). Methane production by ruminants: its contribution to global warming. *Annales de Zootechnie* 49(3), 231-253.
- Neftel, A., Blatter, A., Gut, A., Hogger, D., Meixner, F., Ammann, C., y Nathaus, F. J. (1998). NH₃ soil and soil surface gas measurements in a triticale wheat field. *Atmospheric environment* 32(3), 499-505.
- Ni, J., Heber, A. J., Diehl, H. A., y Lim, T. T. (2000). Ammonia, hydrogen sulphide and carbon dioxide release from pig manure in under-floor deep pits. *Journal of Agricultural Engineering Research* 77(1), 53-66.
- Ni, J., Heber, A. J., Lim, T. T., Duggirala, R., Haymore, B. L., Diehl, C. A., and Sutton, A. L. (1998). Ammonia emission from a large mechanically-ventilated swine building during warm weather. 1998 ASAE Annual International Meeting, 1-16.
- Ni, J., Vinckier, C., Coenegrachts, J., y Hendriks, J. (1999). Effect of manure on ammonia emission from a fattening pig house with partly slatted floor. *Livestock Production Science* 59, 25-31.
- Nicks, B., Laitat, M., Vandenheede, M., Désiron, A., Verhaeghe, C., y Canart, B. (2003). Emissions of ammonia, nitrous oxide, methane, carbon dioxide and water vapor in the raising of weaned pigs on straw-based and sawdust-based deep litters. *Animal Research* 52, 299-308.
- Owen, J. B. (1994). Pollution in Livestock Production Systems - an Overview. Edición: Ap Dewi, I., Axford, R. F. E., Fayez M. Marai, I., y Omed, H. En: *Pollution in Livestock Production Systems*. Capítulo 1, Pag. 1-15. Wallingord (UK), Cab International.
- Park, K. H., Thompson, A. G., Marinier, M., Clark, K., y Wagner-Riddle, C. (2006). Greenhouse gas emissions from stored liquid swine manure in a cold climate. *Atmospheric environment* 40(4), 618-627.
- Pattey, E., Trzcinski, M. K., y Desjardins, R. L. (2005). Quantifying the reduction of greenhouse gas emissions as a result of composting dairy and beef cattle manure. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 72(2), 173-187.
- Pedersen, 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., y Wathes, C. M. (1998). A comparison of three balance methods for calculating ventilation rates in livestock buildings. *Journal of Agricultural Engineering Research* 70(1), 25-37.
- Pelletier, F., Marquis, A., Godbout, S., Joncas, R., Larouche, J. P., Masse, D., y Begue, P. (2005). Gas and odor emissions from swine building materials. *Transactions of the ASAE* 48(2), 721-728.
- Perrino, C. y Catrambone, M. (2004). Development of a variable-path-length diffusive sampler for ammonia and evaluation of ammonia pollution in the urban area of Rome, Italy. *Atmospheric environment* 38, 6667-6672.
- Petersen, S. O., Sommer, S. G., Aaes, O., y Soegaard, K. (1998). Ammonia losses from urine and dung of grazing cattle: effect of N intake. *Atmospheric environment* 32(3), 295-300.

- Phillips, V. R., Holden, M. R., Sneath, R. W., Short, J. L., White, R. P., Hartung, J., Seedorf, J., Schroder, M., Linkert, K. H., Pedersen, S., Takai, H., Johnsen, J. O., Koerkamp, P. W. G. G., Uenk, G. H., Scholtens, R., Metz, J. H. M., y Wathes, C. M. (1998). The development of robust methods for measuring concentrations and emission rates of gaseous and particulate air pollutants in livestock buildings. *Journal of Agricultural Engineering Research* 70(1), 11-24.
- Phillips, V. R., Lee, D. S., Scholtens, R., Garland, J. A., y 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. *Journal of Agricultural Engineering Research* 78(1), 1-14.
- Portejoie, S., Martinez, J., Guiziou, F., y Coste, C. M. (2003). Effect of covering pig slurry stores on the ammonia emission processes. *Bioresource Technology* 87(3), 199-207.
- Randall, D., Burggren, W., y French, K. (1998). *Eckert. Fisiología animal: mecanismos y adaptaciones*.4, McGraw-Hill,. Madrid.
- Redwine, J. S., Lacey, R. E., Mukhtar, S., y Carey, J. B. (2002). Concentration and emissions of ammonia and particulate matter in tunnel-ventilated broiler houses under summer conditions in Texas. *Transactions of the ASAE* 45(4), 1101-1109.
- Reeves, J. B., Van Kessel, J. S., y Malone, G. W. (2002). Quick tests for the determination of ammonia in poultry litter. *Poultry Science* 81(9), 1301-1307.
- Roadman, M. J., Scudlark, J. R., Meisinger, J. J., y Ullman, W. J. (2003). Validation of Ogawa passive samplers for the determination of gaseous ammonia concentrations in agricultural settings. *Atmospheric environment* 37(17), 2317-2325.
- Robertson, A. P., Hoxey, R. P., Demmers, T. G. M., Welch, S. K., Sneath, R. W., Stacey, K. F., Fothergill, A., Filmer, D., y Fisher, C. (2002). Commercial-scale studies of the effect of broiler-protein intake on aerial pollutant emissions. *Biosystems Engineering* 82(2), 217-225.
- Rodhe, L. y Karlsson, S. (2002). Ammonia emissions from broiler manure - Influence of storage and spreading method. *Biosystems Engineering* 82(4), 455-462.
- Rodhe, L. y Rammer, C. (2002). Application of slurry to Ley by band spreading and injection methods. *Biosystems Engineering* 83(1), 107-118.
- Roney, N., Lladós, F., Little, S. S., y Knaebel, D. B. (2004). *Toxicological Profile of Ammonia*., U.S. Department of Health and Human Services,. pp. 1-269.
- Rose, A. J. (2003). Development of an ammonia emission protocol and preliminary emission factor for a central Texas dairy. 1-305.
- SAS. (2001). *SAS User's Guide: Statics*. SAS Institute Inc..
- Schjoerring, J. K., Husted, S. O., y Poulsen, M. M. (1998). Soil-plant-atmosphere ammonia exchange associated with *Calluna vulgaris* and *Deschampsia flexuosa*. *Atmospheric environment* 32(3), 507-512.

- Schjoerring, J. K. y Mattsson, M. (2001). Quantification of ammonia exchange between agricultural cropland and the atmosphere: measurements over two complete growth cycles of oilseed rape, wheat, barley and pea. *Plant and Soil* 228, 105-115.
- Schneider, S. H. (1989). The Greenhouse-Effect - Science and Policy. *Science* 243(4892), 771-781.
- Scholtens, R., Hol, J. M. G., Wagemans, M. J. M., y Phillips, V. R. (2003a). Improved passive flux samplers for measuring ammonia emissions from animal houses, Part I: Basic principles. *Biosystems Engineering* 85(1), 95-100.
- Scholtens, R., Wagemans, M. J. M., y Phillips, V. R. (2003b). Improved passive flux samplers for measuring ammonia emissions from animal houses, Part II: performance of different types of sampler as a function of angle of incidence of airflow. *Biosystems Engineering* 85(2), 227-237.
- Seedorf, J. y Hartung, J. (1999). Survey of ammonia concentrations in livestock buildings. *Journal of Agricultural Science, Cambridge* 133, 433-437.
- Seedorf, J., Hartung, J., Schroder, M., Linkert, K. H., Pedersen, 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., y Wathes, C. M. (1998). A survey of ventilation rates in livestock buildings in Northern Europe. *Journal of Agricultural Engineering Research* 70(1), 39-47.
- Seinfeld, J. H. (1986). *Atmospheric Chemistry and Physics of Air Pollution.1*, John Wiley & Sons,. pp. 1-738.
- Seinfeld, J. H. y Pandis, S. N. (1998). *Atmospheric Chemistry and Physics of Air Pollution.2*, John Wiley & Sons,. pp. 1-1326.
- Selman, C., Lumsden, S., Bunger, L., Hill, W. G., y Speakman, J. R. (2001). Resting metabolic rate and morphology in mice (*Mus musculus*) selected for high and low food intake. *Journal of Experimental Biology* 204(4), 777-784.
- Senevirathna, D. G. M., Achari, G., y Hettiaratchi, J. P. A. (2007). A mathematical model to estimate errors associated with closed flux chambers. *Environmental Modeling & Assessment* 12(1), 1-11.
- Sheridan, B., Curran, T., Dodd, V., y Colligan, J. (2002). Biofiltration of odour and ammonia from a pig unit - a pilot-scale study. *Biosystems Engineering* 82(4), 441-453.
- Sherlock, R. R., Sommer, S. G., Khan, R. Z., Wood, C. W., Guertal, E. A., Freney, J. R., Dawson, C. O., y Cameron, K. C. (2002). Ammonia, methane, and nitrous oxide emission from pig slurry applied to a pasture in New Zealand. *Journal of Environmental Quality* 31, 1491-1501.
- Siefert, R. L., Scudlark, J. R., Potter, A. G., Simonsen, K. A., y Savidge, K. B. (2004). Characterization of atmospheric ammonia emissions from a commercial chicken house on the Delmarva Peninsula. *Environmental Science & Technology* 38(10), 2769-2778.
- Skiba, U., DiMarco, C., Hargreaves, K., Sneath, R., y McCartney, L. (2006). Nitrous oxide emissions from a dung heap measured by chambers and plume methods. *Agriculture Ecosystems & Environment* 112(2-3), 135-139.

- Smith, B. C. (1996). *Fundamentals of Fourier Transform Infrared Spectroscopy*, Boca Raton. CRC Press,. pp. 1-202.
- Smith, K. A., Clayton, H., McTaggart, I. P., Thomson, P. E., Arah, J. R. M., y Scott, A. (1995). The Measurement of Nitrous-Oxide Emissions from Soil by Using Chambers. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London Series A-Mathematical Physical and Engineering Sciences* 351(1696), 327-337.
- Snell, H. G. J., Seipelt, F., y Van den Weghe, H. F. A. (2003). Ventilation rate and gaseous emissions from naturally ventilated dairy houses. *Biosystems Engineering* 86(1), 67-73.
- Sommer, S. G. y Dahl, P. (1999). Nutrient and carbon balance during the composting of deep litter. *Journal of Agriculture Engineering Research* 74, 145-153.
- Sommer, S. G., Hansen, M. N., y Søgaard, H. T. (2004a). Infiltration of slurry and ammonia volatilisation. *Biosystems Engineering* 88(3), 359-367.
- Sommer, S. G. y Jacobsen, O. H. (1999). Infiltration of slurry liquid and volatilization of ammonia from surface applied pig slurry as affected by soil water content. *Journal of Agricultural Science* 132, 297-303.
- Sommer, S. G., McGinn, S. M., Hao, X., y Larney, F. J. (2004b). Techniques for measuring gas emissions from a composting stockpile of cattle manure. *Atmospheric environment* 38(28), 4643-4652.
- Sommer, S. G. y Olesen, J. E. (2000). Modelling ammonia volatilization from animal slurry applied with trail hoses to cereals. *Atmospheric environment* 34(15), 2361-2372.
- Steele, L., Dlufokecky, E., Lang, P., Tans, P., Martin, R., y Masarie, K. (1992). Slowing down of the global accumulation of atmospheric methane during the 1980s. *Nature* 358(6384), 313-316.
- Structured Data, L. (2005). RiskAMP. [2.08].
- Thijsse, T., Duyzer, J. H., Verhagen, H. L. M., Wyers, G. P., Wayers, A., y Mols, J. J. (1998). Measurement of ambient ammonia with diffusion tube samplers. *Atmospheric environment* 32(3), 333-337.
- Thompson, R. B. y Meisinger, J. J. (2002). Management factors affecting ammonia volatilization from land-applied cattle slurry in the mid-Atlantic USA. *Journal of Environmental Quality* 31, 1329-1338.
- Todd, L. A., Ramanathan, M., Mottus, K., Katz, R., Dodson, A., y Mihlan, G. (2001). Measuring chemical emissions using open-path Fourier transform infrared (OP-FTIR) spectroscopy and computer-assisted tomography. *Atmospheric environment* 35, 1937-1947.
- UNFCCC. (1992). *Convencion marco de las naciones unidas sobre el cambio climático*. New York.
- UNFCCC. (1997). *Protocolo de Kyoto de la concención marco de las naciones unidas sobre el cambio climático*.
- UNFCCC. (2005). *Cuidar el clima. Guia de la Convencion Marco sobre el Cambio Climático y el protocolo de Kyoto*. Editors: Depledge, J. y Lamb, R. Secretaría de la Convención Marco sobre el Cambio Climático (CMCC),. Bonn.

- van der Peet-Schwering, C. M. C., Aarnink, A. J. A., Rom, H. B., y Dourmad, J. Y. (1999). Ammonia emissions from pig houses in The Netherlands, Denmark and France. *Livestock Production Science* 58, 265-269.
- van Ouwerkerk, E. N. J. and Pedersen, S. (1994). Application of the carbon dioxide mass balance method to evaluate ventilation rates in livestock buildings. *Proceedings of the XII World Congress on Agricultural Engineering*, 516-529. Milan, Italy.
- Villagr a, A., Blanes, V., y Torres, A. (2004). *Fisiolog a ambiental y bioclimatolog a del conejo*. ASESCU. 132(2), pp. 6-16. Bolet n de cunicultura.
- von Wachenfelt, E., Pedersen, S., y Gustafsson, G. (2001). Release of heat, moisture and carbon dioxide in an aviary system for laying hens. *British Poultry Science* 42(2), 171-179.
- Vranken, E., Claes, S., Hendriks, J., Darius, P., y Berckmans, D. (2004). Intermittent measurements to determine ammonia emissions from livestock buildings. *Biosystems Engineering* 88(3), 351-358.
- Wagner-Riddle, C., Park, K. H., y Thurtell, G. W. (2006). A micrometeorological mass balance approach for greenhouse gas flux measurements from stored animal manure. *Agricultural and Forest Meteorology* 136(3-4), 175-187.
- Wang, S. Y. y Huang, D. J. (2005). Assessment of greenhouse gas emissions from poultry enteric fermentation. *ASIAN-AUSTRALASIAN JOURNAL OF ANIMAL SCIENCES* 18(6), 873-878.
- Wassmann, R., Buendia, L. V., Lantin, R. S., Bueno, C. S., Lubigan, L. A., Umali, A., Nocon, N. N., Javellana, A. M., y Neue, H. U. (2000). Mechanisms of crop management impact on methane emissions from rice fields in Los Ba os, Philippines. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 58, 107-119.
- Wathes, C. M. y Charles, D. R. (1994). *Livestock Housing*.1, CAB International,. Wallingford, pp. 1-428.
- Wathes, C. M., Holden, M. R., Sneath, R. W., White, R. P., y Phillips, V. R. (1997). Concentrations and emission rates of aerial ammonia, nitrous oxide, methane, carbon dioxide, dust and endotoxin in UK broiler and layer houses. *British Poultry Science* 38(1), 14-28.
- Webb, J., Chadwick, D., y Ellis, S. (2004). Emissions of ammonia and nitrous oxide following incorporation into the soil of farmyard manures stored at different densities. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 70(1), 67-76.
- Wheeler, E. F., Casey, K. D., Gates, R. S., Xin, H., Zajackowsky, J. S., Topper, P. A., Liang, Y., y Pescatore, A. J. (2006). Ammonia emissions from twelve U.S. broiler chicken houses. *Transactions of the ASAE* 49(5), 1495-1512.
- Wheeler, E. F., Weiss, R. W. J., y Weidenboerner, E. (2000). Evaluation of instrumentation for measuring aerial ammonia in poultry houses. *Journal of Applied Poultry Research* 9(4), 443-452.

- White, C. R. y Seymour, R. S. (2003). Mammalian basal metabolic rate is proportional to body mass^(2/3). *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 100(7), 4046-4049.
- Wilhelm, L. R., Milner, J. M., Snyder, S. D., y McKinney, D. B. (2001). An instrumentation system for environmental measurements in broiler and swine housing. *Applied Engineering in Agriculture* 17(5), 677-681.
- Wolter, M., Prayitno, S., y Schuchardt, F. (2004). Greenhouse gas emission during storage of pig manure on a pilot scale. *Bioresource Technology* 95(3), 235-244.
- Wulf, S., Maeting, M., y Clemens, J. (2002). Application technique and slurry co-fermentation effects on ammonia, nitrous oxide, and methane emissions after spreading: ammonia volatilization. *Journal of Environmental Quality* 31, 1789-1794.
- Yamulki, S. (2006). Effect of straw addition on nitrous oxide and methane emissions from stored farmyard manures. *Agriculture Ecosystems & Environment* 112(2-3), 140-145.
- Zahn, J. A., Hatfield, J. L., Laird, D. A., Hart, T. T., Do, Y. S., y DiSpirito, A. A. (2001). Functional classification of swine manure management systems based on effluent and gas emission characteristics. *Journal of Environmental Quality* 30, 635-647.
- Zhu, J., Jacobson, L., Schmidt, D., y Nicolai, R. (2000). Daily variations in indoor and gas emissions from animal facilities. *Applied Engineering in Agriculture* 16(2), 153-158.

UNIVERSIDAD POLITECNICA DE VALENCIA

Departamento de Ciencia Animal



**DISEÑO Y PUESTA EN FUNCIONAMIENTO DE UNA
CÁMARA DINÁMICA PARA EL REGISTRO DE EMISIONES
DE GASES PROCEDENTES DE ESTIÉRCOLES Y
PEQUEÑOS ANIMALES**

ANEJOS

Anejo 1. Características técnicas del material utilizado

1. Sistemas de medición de gases

1.1. Sensor infrarrojos de dióxido de carbono VAISALA CARBOCAP®

Para las medidas en continuo de dióxido de carbono se empleó un transmisor **Vaisala CARBOCAP®** de dióxido de carbono de la **serie GMT 222**. Dicho aparato se compone a su vez de dos partes, por un lado se encuentra el sensor de dióxido de carbono **CARBOCAP (Figura A-1)** y por otro lado se encuentra el transmisor que convierte en una señal eléctrica la medida de dióxido de carbono detectada por el sensor (**Figura A-2**). El rango de medida de este sensor es de 0 a 10.000 ppm en volumen.



Figura A-1. Sensor de dióxido de carbono CARBOCAP®

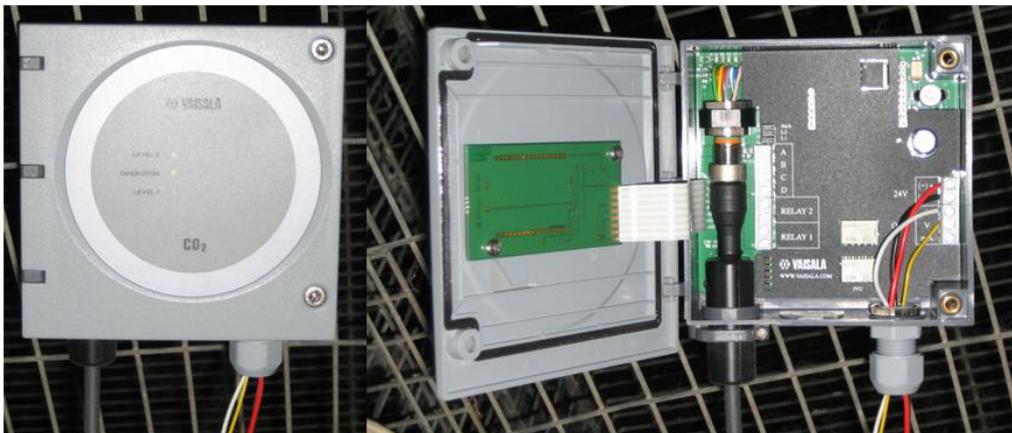


Figura A-2. Transmisor VAISALA GMT 222

El transmisor no posee memoria interna donde almacenar los datos, pero proporciona una señal eléctrica fácilmente registrable en un *datalogger*. La señal puede ser emitida en forma de intensidad (4-20 mA) o de voltaje (0-10 V).

Este equipo está diseñado para poder ser utilizado en condiciones industriales con elevadas exigencias en robustez, además tolera la presencia de cierta cantidad de polvo sin sufrir variaciones en las medidas, por ello, se antoja como un equipo adecuado para la medida de dióxido de carbono en condiciones de granja.

1.1.1. Principio de medida

1.1.2. Datos técnicos del sensor

Los datos técnicos del sensor de dióxido de carbono CARBOCAP[®] se muestran en la **Tabla A-1**.

| Tabla A-1: Datos técnicos del sensor CARBOCAP[®] | |
|--|---|
| <i>Especificación</i> | Sensor dióxido de carbono CARBOCAP[®] |
| <u>Condiciones operativas</u> | |
| temperatura | -20°C a 60°C |
| humedad relativa | 0% a 100% |
| Almacenamiento | -30°C a 70°C |
| Vida media del sensor | 24 meses |
| <u>Repetibilidad</u> | |
| cero | ≤ ± 20 ppm |
| sensibilidad | ≤ ± 2 % del valor medido |
| Efecto de la temperatura | -0,3% de la lectura/°C |
| Efecto de la presión | +0,15% de la lectura/hPa |
| Tiempo de respuesta (25°C) | ≤ 30 segundos |

1.2. **Sensor infrarrojo de dióxido de carbono DrägerSensor Smart IR CO₂**

Para las medidas puntuales de dióxido de carbono se empleó el sensor infrarrojo **DrägerSensor Smart IR CO₂**, incorporado a un detector portátil de gas **X-am 7000**. En la **Figura A-3** se muestra el detector X-am 7000 en funcionamiento.



Figura A-3: Sensor X-am 7000

El sensor es apropiado para la medición en tiempo real de la concentración de dióxido de carbono en aire. El sensor incluye una memoria interna (EEPROM) que es evaluada por el instrumento apropiado de la propia casa comercial. El rango de medición es de 0 a 10.000 ppm en volumen.

1.2.1. Principio de medida

El principio de medida de este equipo es el mismo que se ha descrito anteriormente, basado en la tecnología NDIR.

1.2.2. Datos técnicos del sensor

Los datos técnicos del sensor de amoniaco Smart IR CO₂ se muestran en la **Tabla A-2**.

| Tabla A-2: Datos técnicos del sensor Smart IR CO ₂ | |
|--|---|
| <i>Especificación</i> | Sensor de dióxido de carbono Smart IR CO₂ |
| <u>Condiciones operativas</u> | |
| temperatura | -20°C a 60°C |
| presión | 700 a 1300 mb |
| humedad relativa | 10% a 95% |
| Almacenamiento | 0°C a 30°C 30% a 80% de humedad relativa |
| Vida media del sensor | 60 meses |
| <u>Repetibilidad</u> | |
| cero | ≤ ± 100 ppm |
| sensibilidad | ≤ ± 5 % del valor medido |
| Tolerancia lineal | ≤ ± 5 % del rango de medida |
| Tiempo de respuesta (20°C) | ≤ 45 segundos |

2. Bomba de aire Silent-Pump AC-9902

La bomba de aire Silent-Pump AC-9-02 (Resun®), es una bomba diseñada para el suministro de aire en acuarios, por lo que es capaz de proporcionar un caudal constante durante largos periodos de tiempo.

La bomba está compuesta por un cuerpo central donde se localizan las membranas de impulsión, una entrada de aire en la que se dispone de un filtro de partículas fácilmente reemplazable y dos salidas de aire de 4 mm de diámetro, con una capacidad de impulsión de 3,5 l/min cada una de ellas. La presión de trabajo es superior a 0,012MPa y tiene una potencia aproximada de 4 Watt. La muestra un detalle de la bomba en el interior de la urna y con la conexión de los tubos de impulsión en las dos salidas.



Figura A-4. Bomba de aire Silent-Pump AC-9-02

3. Ventilador

El ventilador **Power Logic PL80S12M** es un ventilador de tipo axial de reducidas dimensiones diseñado para un funcionamiento en continuo durante largos periodos de tiempo. Hay que considerar que este tipo de ventiladores son empleados habitualmente para la refrigeración de equipos informáticos, por lo que su fiabilidad en el tiempo está garantizada.

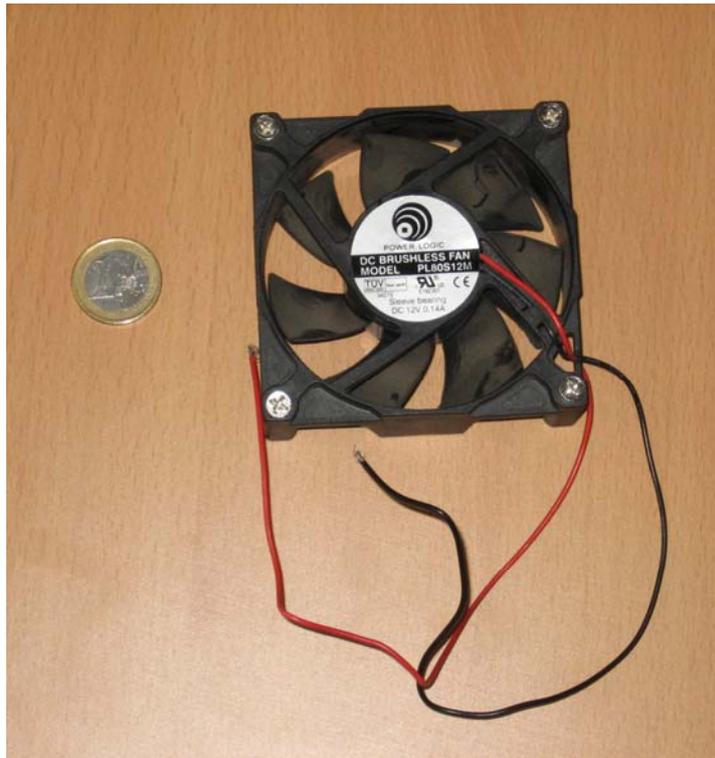


Figura A-5. Ventilador Power Logic PL80S12M

La **Tabla A-3** recoge las principales características técnicas del ventilador **PL80S12M**.

| Tabla A-3: Datos técnicos del ventilador PL80S12M | |
|--|------------------------|
| Especificación | Valor |
| Dimensiones | 80x80x25 mm |
| Velocidad de giro | Media |
| Tipo de rodamiento | Deslizante (sin bolas) |
| Voltaje | 12V |
| Intensidad | 0,14 A |
| Velocidad de giro | 2.500 rpm |
| Caudal de trabajo | 3,4 l/min |
| Presión | 30,6 KPa |
| Nivel sonoro | 29,8 dBA |

Con el fin de reducir el caudal y, por lo tanto, la velocidad del aire proporcionada por el ventilador, se puede reducir el voltaje suministrado hasta 5V sin que ello produzca anomalías en el funcionamiento del equipo.

4. Registrador HOBO® H08-004-02

El registrador HOBO H08-004-02 permite medir y almacenar datos de temperatura, humedad e iluminación, además de un canal adicional utilizado para disponer de una sonda exterior de temperatura.

Su capacidad de almacenamiento es de 7944 pares de medidas (medición – tiempo). La **Figura A-6** muestra una el sensor; se puede apreciar su reducido tamaño.



Figura A-6. Registrador HOBO® H08-004-02

4.1. Deriva temporal

La incertidumbre en la medición del tiempo varía con la temperatura, pero se sitúa en torno a ± 100 ppm a la semana (equivalente a 1 minuto semanal). La deriva temporal depende de la temperatura tal y como se refleja en la **Figura A-7**.

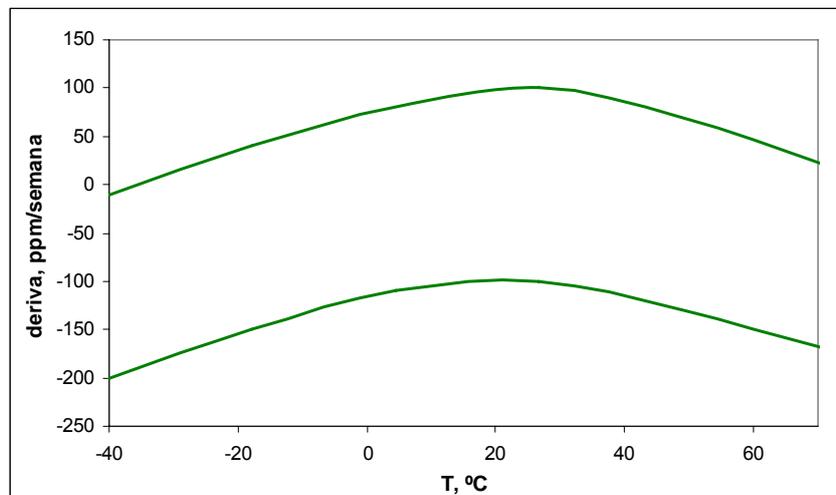


Figura A-7. Deriva temporal

4.2. Temperatura

El sensor interno de temperatura mide la temperatura ambiente dentro del rango de medida (-40°C a $+120^{\circ}\text{C}$), con tiempo de respuesta de unos 15 minutos con aire en calma.

La resolución es inferior a $0,4^{\circ}\text{C}$ para el rango habitual de medida, mientras que la precisión es inferior a $0,7^{\circ}\text{C}$, aunque estos valores dependen de la temperatura, según se muestra en la **Figura A-8**.

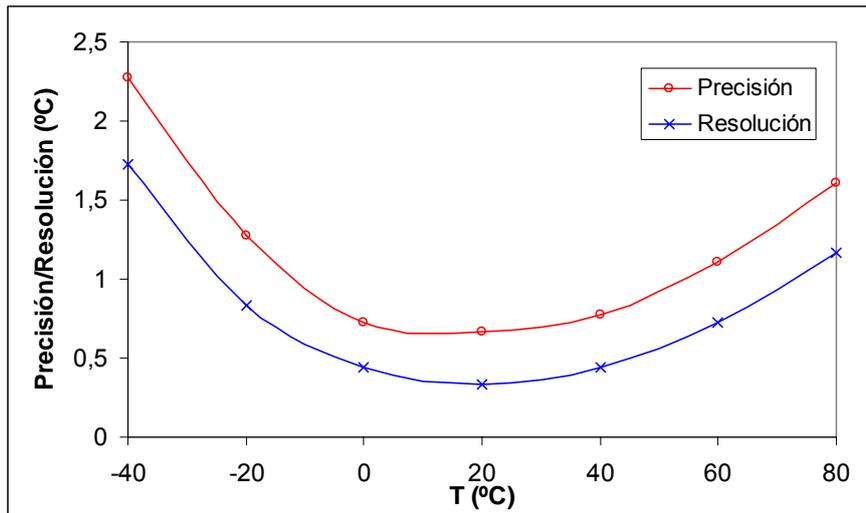


Figura A-8. Precisión y resolución de medición en función de la temperatura

4.3. Humedad relativa

El sensor de humedad relativa funciona con compensación por temperatura, con una precisión de $\pm 5\%$ dentro del rango de temperatura de $+5$ a $+50$ °C. Para elevadas humedades relativas (superiores al 60%), la precisión es de $\pm 10\%$.

El rango de medida oscila habitualmente entre 25 y 95 %. La deriva temporal es inferior al 1% anual. El sensor se puede estropear en caso de condensación. El rango de medida recomendado varía con la temperatura, según se muestra en la **Figura A-9**.

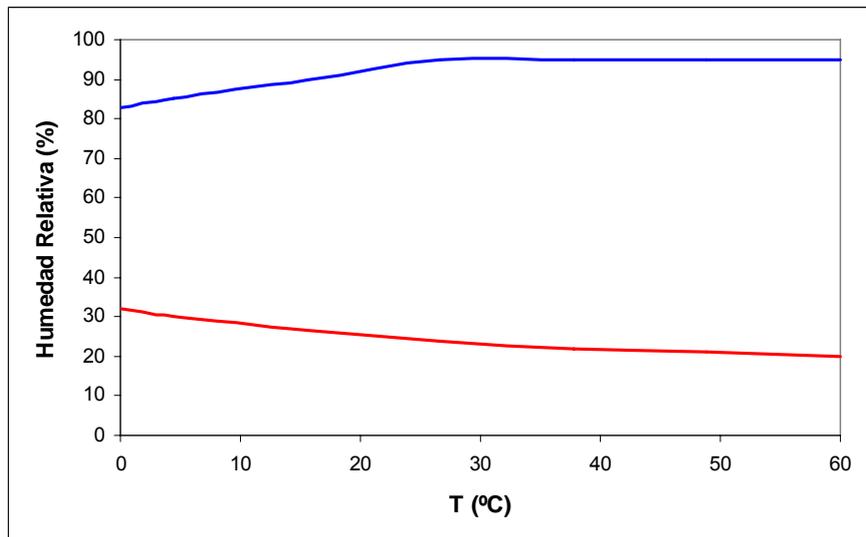


Figura A-9. Rango de medición de la humedad relativa

4.4. Entrada externa de voltaje

EL puerto exterior puede adaptarse bien para una señal eléctrica de intensidad o para una señal de tensión eléctrica, que permite tomar datos a través de una entrada simple de voltaje. La entrada de voltaje se realiza a través de un *jack* estéreo de 2,5 mm de diámetro.

Esta entrada lee señales de entre 0 y 2,5 voltios de corriente continua, con un desfase máximo entre medidas de $\pm 0,1\mu\text{A}$ y de $\pm 0,4\mu\text{A}$ durante las medidas del sensor (5,4 ms cada una). La precisión es de $\pm 10\text{ mV}$ o $\pm 3\%$ de la lectura. La impedancia de entrada es de 10Ω .