



EDUCACIÓN

SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA

Instituto Tecnológico de La Laguna



TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN

**"Modelo de estimación y dispersión del metano en
zona rural utilizando tecnologías limpias"**

POR

M.C. Ramón Humberto Sandoval Rodríguez

T E S I S

**PRESENTADO COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE DOCTOR
EN CIENCIAS EN INGENIERÍA ELÉCTRICA**

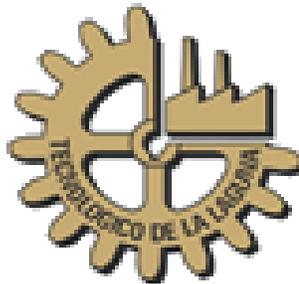
DIRECTOR DE TESIS

Dr. Francisco Gerardo Flores García

CODIRECTOR DE TESIS

Dr. Mario Francisco Jesús Cepeda Rubio

ISSN: 0188-9060



RIITEC: 04 - TDCIE - 2021

Torreón, Coahuila. México

Diciembre 2021



Instituto Tecnológico de La Laguna

Torreón, Coah., 15/Diciembre/2021

Dependencia: DEPI/CPCIE

Oficio: DEPI/CPCIE/047/2021

Asunto: Autorización de impresión de tesis.

M.C. Ramón Humberto Sandoval Rodríguez
C. CANDIDATO AL GRADO DE DOCTOR EN CIENCIAS EN INGENIERÍA ELÉCTRICA.
PRESENTE

Después de haber sometido a revisión su trabajo de tesis titulado:

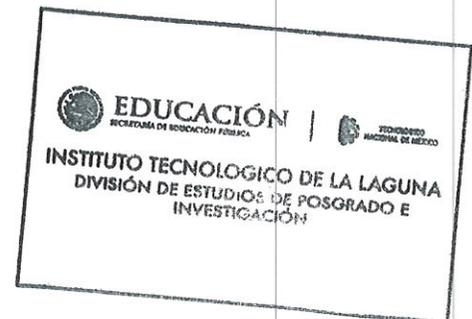
"Modelo de estimación y dispersión del metano en zona rural utilizando tecnologías limpias"

Habiendo cumplido con todas las indicaciones que el jurado revisor de tesis hizo, se le comunica que se le concede la autorización con número de registro **RIITEC: (04)-TDCIE-2021**, para que proceda a la impresión del mismo.

ATENTAMENTE

EDUCACIÓN TECNOLÓGICA FUENTE DE INNOVACIÓN

DR. JOSÉ IRVING HERNÁNDEZ JACQUEZ
Jefe de la División de Estudios de Posgrado e Investigación
del Instituto Tecnológico de la Laguna





Torreón Coah., 15/Diciembre/2021

DR. JOSÉ IRVING HERNÁNDEZ JACQUEZ
JEFE DE LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN

Por medio de la presente, hacemos de su conocimiento que después de haber sometido a revisión el trabajo de tesis titulado:

“Modelo de estimación y dispersión del metano en zona rural utilizando tecnologías limpias”

Desarrollado por el **C. Ramón Humberto Sandoval Rodríguez**, con número de control **D1713001** y habiendo cumplido con todas las correcciones que se le indicaron, estamos de acuerdo que se le conceda la autorización de la fecha de examen de grado para que proceda a la impresión de la misma.

ATENTAMENTE

EDUCACIÓN TECNOLÓGICA FUENTE DE INNOVACIÓN

Dr. Francisco Gerardo Flores García
Asesor/Director de Tesis

Dr. Mario Francisco Jesús Cepeda Rubio
Coasesor/Co Director de Tesis

Dr. Francisco Valdés Perezgasga
Comité Tutorial

Dr. Héctor Aurelio Moreno Casillas
Comité Tutorial

Dr. Guillermo González Cervantes
Comité Tutorial Externo



Dedicado a quién ha sido un remanso de paz en tiempos tormentosos

y una luz en la oscuridad.

A mi inseparable compañera de viaje, Fabiola

AGRADECIMIENTOS

“Porque todas las cosas vienen de él y son por él y para él. A él vaya la gloria para siempre. Amén.” Ro 11:36.

A mi familia, en quienes siempre he encontrado apoyo y motivación para seguir adelante.

Al Dr. Francisco Gerardo Flores García por su guía y consejos en el desarrollo de este proyecto y en la vida misma.

Al Dr. Mario Francisco Gerardo Cepeda Rubio por sus atenciones y apoyo incondicional en todo momento.

A mis revisores de tesis, Dr. Francisco Valdés Perezgasga y Dr. Héctor Aurelio Moreno Casillas, por compartir su conocimiento y sus consejos.

A la Secretaría de Energía (SENER) y al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por apoyarme con una beca durante los cuatro años del estudio de doctorado.

CONTENIDO

CAPITULO 1: INTRODUCCIÓN	1
1.1. Introducción	2
1.2. Justificación y planteamiento del problema	7
1.3. Objetivo general	8
1.4. Contribuciones de la tesis.....	8
1.5. Organización del documento.....	9
CAPÍTULO 2: EL METANO (CH ₄)	11
2.1. Introducción	12
2.2. Gases de efecto invernadero.....	13
2.3. Fuentes de generación de metano.....	14
2.4. Metanogénesis.....	15
2.5. Métodos para monitorear metano entérico.....	18
2.6. El metano en la actualidad	20
2.7. Emisiones de metano e inventarios nacionales	22
CAPÍTULO 3: REDES INALÁMBRICAS DE SENSORES (WSN).....	44
3.1. Introducción	45
3.2. Redes Inalámbricas de Sensores (WSN Wireless Sensor Networks)	47
3.3. Componentes de una WSN	56
CAPÍTULO 4: MODELOS DE DISPERSIÓN	76
4.1. Introducción	77
4.2. Meteorología y atmósfera.....	78
4.3. La estructura dinámica de la atmósfera.....	84
4.4. Circulación vertical y estabilidad atmosférica	92
4.5. Instrumentos meteorológicos	102
4.6. Modelos de dispersión.....	110
4.7. Tipos de modelos de dispersión del aire	117
4.8. Perfiles de concentración	129
CAPÍTULO 5: DESARROLLO DEL PROYECTO	133
5.1. Introducción	134
5.2. Mediciones de metano entérico a través de la red inalámbrica de sensores (WSN)	136
5.3. Estimaciones de generación de metano.....	159

5.4. Modelos de dispersión aplicados a las mediciones	163
CAPÍTULO 6: CONCLUSIONES	182
6.1. Discusiones.....	183
6.2. Conclusiones	186
6.3. Trabajos futuros.....	188
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	189

**CAPITULO 1:
INTRODUCCIÓN**

1.1. Introducción

Un gas de efecto invernadero (GEI) es un gas atmosférico que absorbe y emite radiación dentro del rango infrarrojo. Este proceso es la causa fundamental del efecto invernadero. Los principales GEI en la atmósfera terrestre son el vapor de agua, el dióxido de carbono, el metano, el óxido de nitrógeno, los hidrofluorocarbonos, los perfluorocarbonos, el hexafluoruro de azufre y el ozono (Velasco *et al.*, 2016). Sin los gases de efecto invernadero la temperatura promedio de la superficie terrestre sería alrededor de $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$, en lugar de la media actual de $15\text{ }^{\circ}\text{C}$. Las actividades humanas desde el inicio de la Revolución Industrial (considerado en 1750) ha producido un incremento del 40 % en la concentración atmosférica del dióxido de carbono, de fórmula CO_2 , desde 280 ppm en 1750 a 400 ppm en 2015. Este incremento ha ocurrido a pesar de la absorción de una gran porción de las emisiones por varios depósitos naturales que participan del ciclo del carbono. Las emisiones de CO_2 antropogénicas, aquellas producidas por actividades humanas, provienen de la combustión de combustibles fósiles, principalmente carbón, petróleo y gas natural, además de la deforestación, la erosión del suelo y la crianza animal.

La agricultura y la producción pecuaria contribuyen ampliamente a las emisiones antropogénicas de CH_4 , CO_2 y N_2O a la atmósfera. Por estos motivos se están encaminando esfuerzos a reducir las emisiones y prevenir el calentamiento global, y proteger así el sistema climático natural del planeta, y se considera que los sistemas de producción animal sostenibles deben propender por una menor producción de CH_4 (Cuevas-Martínez *et al.*, 2010).

El estudio “Wireless Intelligent Sensors Management Application Protocol-WISMAP”, presentado por Cuevas-Martínez *et al.* (2010), está basado en un análisis de 257 publicaciones encontradas a nivel mundial relacionadas con la producción de metano a partir de desechos orgánicos, en particular de desechos orgánicos de rumiantes.

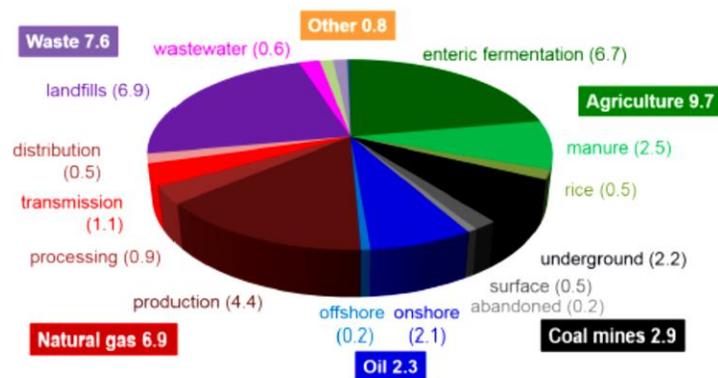


Figura 1.1. Principales fuentes antropogénicas de gas metano.

La Figura 1.1, tomada de “Micro Sensor Node for Air Pollutant Monitoring: Hardware and Software Issues” (Choi *et al.*, 2009), estima la distribución de metano a nivel mundial basada en las observaciones satelitales de metano atmosférico en el 2012. Como se puede apreciar el 6.7% del metano generado a nivel mundial proviene de la fermentación entérica. El estudio sugiere que los pantanos son la fuente primaria de generación de metano, sin embargo, en “A wireless sensor network for urban environmental health monitoring: UrbanSense” (Rainham *et al.*, 2016) se menciona que los campos son las fuentes primarias de metano atmosférico.

En México, en el 2010, el Inventario Nacional de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero reportó que las emisiones de CH₄ fueron 7,938.9 Gg de CO₂eq, lo que representa un incremento de 59.8% con respecto a 1990, cuyas principales fuentes de emisión corresponden a desechos, energía y agricultura. Siendo esta última la responsable de aportar el 43% del total de emisión de CH₄ a través de la ganadería.

Datos del 2013, según el Congreso Internacional de Médico Veterinario Zootecnista Laguna, la Región Lagunera era la cuenca lechera más importante del país y de Latinoamérica, con más de

300 establos tecnificados con un promedio de producción de 29 a 30 litros de leche diaria por vaca por día. Ejercicios recientes han demostrado que una vaca puede llegar a producir hasta 50 litros de leche diarios. El censo de ganado lechero en números redondos es de 443,000 animales y de estos 249,000 están en producción, según datos de la SAGARPA en el 2012.

Para el 2015, La Comarca Lagunera ocupaba el primer lugar a nivel nacional en la producción de leche, carne de ave y forrajes. El valor de la producción agropecuaria de la región ascendió a los 38 mil 600 millones de pesos, colocando a ésta zona del país en el séptimo lugar a nivel nacional. El delegado federal de la SAGARPA en la Región Lagunera de Coahuila y Durango expresó que la región tiene una producción de más de 2 mil 330 millones de litros anuales, ocupando el primer lugar a nivel nacional en la producción de leche. (SAGARPA, 2016). Por lo anterior, el realizar investigaciones que permitan muestrear la producción de metano en la región adquiere una relevancia importante.

Uno de los efectos secundarios de esto es la cantidad de estiércol que se produce por el sector ganadero, siendo este la principal fuente productora de CH₄ a partir de desechos orgánicos. La investigación en nutrición animal se ha enfocado en su mayor parte a encontrar métodos para reducir las emisiones de CH₄ debido a la ineficiencia energética que ocurre en el rumen, y no por el rol del CH₄ en el calentamiento global (W. Yi *et al.*, 2015).

El municipio de Torreón no cuenta con información, infraestructura o referencias de carácter científico actuales que le permitan conocer en cierta medida el grado de contaminación ambiental que se presenta, no solo en el área urbana de la ciudad de Torreón, sino también en el área rural circunvecina. Esto debido a las deficiencias que se encuentran en los marcos normativos de la Comarca Lagunera por la falta de indicadores o límites y por ende, mediciones y/o controles, referentes al medio ambiente y en particular al metano, ya que si bien el Gobierno Municipal

cuenta con el “reglamento de desarrollo sustentable y protección al ambiente del municipio de Torreón, Coahuila”, en el cual se detalla con exactitud los lineamientos, las acciones y multas consideradas para cada uno de los posibles eventos de contaminación (visual, auditiva, de suelos, de aguas y de aire), no se encuentra ningún normativo referente a la contaminación ambiental por desechos orgánicos y en particular por rumiantes, fuente primaria en la región de contaminación ambiental por metano. Adicional a esto, no se especifican tampoco las cantidades límites permisibles para cada uno de los GEI. Únicamente hace referencia a la política nacional establecida por SEMARNAT.

La calidad del aire en zonas urbanas es una preocupación mayor en ciudades modernas debido al impacto significativo de la contaminación ambiental en la salud pública, medioambiente global y economía mundial. Estudios recientes revelan la importancia de contar con información de contaminación a micro-niveles, incluyendo exposición humana y exposición aguda a contaminantes del aire. Tradicionalmente, la situación de la contaminación ambiental es monitoreada por sistemas de monitoreo de contaminación de aire convencionales con monitores estáticos. Estas estaciones de monitoreo son altamente confiables, precisas y habilitadas para medir un amplio rango de contaminantes usando instrumentos analíticos convencionales, tales como espectrofotómetros de gas (Pummakarnchana *et al.*, 2005). Un sistema de tiempo real con resolución alta de espacio-tiempo es esencial debido a la disponibilidad limitada y no escalable de los sistemas de monitoreo para contaminación del aire.

Muchos estudios recientes se han enfocado en varios aspectos de las WSN, las cuales están compuestas por: Un número significativo de nodos, que consisten en una unidad de procesamiento con capacidad computacional y memoria limitada; sensores, dispositivos de comunicación inalámbrica y una fuente limitada de poder. Aunque los nodos sensores tienen restricciones fuertes

en sus recursos de energía y capacidad computacional, pueden ser usados para sensado continuo, detección de eventos, identificación de eventos, sensado de lugares, y control local de actuadores. Como resultado, el rango de aplicaciones de WSNs es muy amplio, e incluye sistemas de monitoreo ambiental, agricultura inteligente, sobrevivencia, monitoreo de salud, monitoreo de tráfico, y control y monitoreo industrial (Jacob *et al.*, 2016).

Con el fin de aumentar la resolución espacio-tiempo para la información de contaminación ambiental, los investigadores están llevando al límite los sistemas de monitoreo de contaminación ambiental al combinar sensores ambientales de bajo costo portátiles y las WSN en un sistema que es conocido como Sistemas de Monitoreo de Contaminación del Aire de Nueva Generación (TNGAPMS) (Yi *et al.*, 2015), con esto, se puede actualizar la información en minutos e incluso segundos. Por lo que han logrado avances importantes empleando tecnologías avanzadas de sensado, Sistemas MicroElectroMecánicos (MEMs por sus siglas en inglés) y Redes Inalámbricas de Sensores (WSN por sus siglas en inglés). Estudios previos han explorado típicamente problemas del sistema que incluyen el middleware o la eficiencia de la red, pero la mayoría de las investigaciones han considerado apenas los detalles del hardware y software propios de los nodos (Jacob *et al.*, 2016).

J.R. Knapp (2014) plantea, como punto importante en su trabajo, una orientación más intensa de las políticas de mitigación hacia el CH₄ y N₂O, pues considera que para la industria lechera es más económico, y benéfico para el ambiente, mitigar dichas emisiones, que para los otros sectores industriales las emisiones de CO₂.

Finalmente, como mencionan Cunha *et al.* (2016) en su estudio “Greenhouse gases inventory and carbon balance of two dairy systems obtained from two methane-estimation methods”, es esencial la investigación para determinar las emisiones de GEI provenientes del sector ganadero para

desarrollar nuevas prácticas sustentables. Por ello, es importante contar con diversas formas de estimar y medir tanto la concentración como la dispersión del metano entérico, y las ventajas que ofrecen las WSN abren la posibilidad para facilitar el desarrollo de estos estudios.

1.2. Justificación y planteamiento del problema

Si bien es cierto que en años recientes se han hecho esfuerzos por realizar acciones para reducir las emisiones de GEI en todo el mundo, a ciencia cierta no se tiene conocimiento del nivel de contaminación provocado por otros gases adicionales al CO₂. El metano, al ser un gas con alto nivel de forzamiento radiativo, 28 veces más que el CO₂, debe ser estudiado, estimado y medido para emprender acciones más específicas que redunden en una disminución significativa de sus niveles en la atmósfera. Si bien, las directrices planteadas por el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC) son un primer paso orientado a la mitigación de generación de GEI, dentro del cual se encuentra el metano entérico, no son suficientes para determinar realmente la magnitud del problema.

Por lo anterior, es importante contar no sólo con una estimación aproximada de emisiones de metano entérico, sino también contar con mediciones que reflejen la situación real de las emisiones. Para realizar esto, se emplean WSNs, ya que han sido la herramienta más comúnmente usadas en el monitoreo ambiental debido a su amplia cobertura espacio-temporal y bajo costo. Este proyecto pretende por un lado conocer las posibles magnitudes de emisiones de metano entérico y, por otro lado, medir la concentración de gas generado por una población rumiante a través de una WSN de bajo consumo energético empleando energías limpias. Adicionalmente, hay que considerar el posible destino o trayecto que tendría el contaminante, en este caso el metano entérico, al ser liberado a la atmósfera.

1.3. Objetivo general

El presente trabajo doctoral tiene como objetivo el desarrollar, por un lado, los métodos de estimación de nivel 1 y 2 planteados por el IPCC, y por el otro, una WSN de bajo consumo energético que permita obtener las concentraciones generadas por el ganado vacuno en un establo típico de la Región Lagunera. Una vez obtenidos los dos resultados, comparar la información para determinar en un sentido, el grado de certeza de las guías de estimación, y en otro, obtener valores más precisos de la emisión de metano entérico. Finalmente, establecer un posible patrón de dispersión y distribución de la concentración del metano al producirse por el ganado.

Objetivos específicos

- Analizar la dispersión del metano en un área determinada.
- Dar a conocer los resultados del estudio de dispersión, así como del monitoreo realizado a la(s) entidad(es) correspondiente(s)
- Realizar al menos una publicación en un medio de divulgación científica nacional o extranjero.

1.4. Contribuciones de la tesis

Las contribuciones de esta tesis son las siguientes:

- Comparativo entre las estimaciones de nivel 1 y nivel 2 referente a las emisiones de metano entérico basadas en la guía del Panel Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático.
- Comparativo entre las estimaciones obtenidas y los valores medidos de concentración de metano entérico en un establo típico de la Región Lagunera.

- Introducir el estudio de los modelos de dispersión a la línea de investigación del Posgrado en Ciencias en Ingeniería Eléctrica del TecNM – Campus La Laguna.

1.5. Organización del documento

El contenido de este documento está distribuido como a continuación se describe:

El capítulo 2 da a conocer la información relacionada con el metano, sus características, el metano como gas de efecto invernadero, las diversas fuentes de generación, los métodos más comúnmente empleados para realizar mediciones del mismo, la situación actual que guarda el estudio del metano, los estudios más recientes respecto a la medición del gas, así como una descripción de la guía para las estimaciones de metano entérico propuesta por el Panel Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático.

El capítulo 3 comprende los aspectos relacionados con las redes inalámbricas de sensores, las áreas de aplicación, una alternativa de clasificación de redes inalámbricas, estudios recientes en los que se han empleado desde el punto de vista ambiental y los componentes de una red considerando el sensor, la unidad de procesamiento y la unidad de comunicación.

Continuando, en el capítulo 4, se abordan los dos modelos de dispersión más empleados: el modelo gaussiano de pluma y el modelo lagrangiano estocástico. Las bases de la meteorología, parte fundamental de los modelos de dispersión. Finalmente, los métodos para la estimación de concentración de un gas a partir de su dispersión, en este trabajo se presentan dos: el modelo de partículas en la celda y el modelo de distribución kernel.

El desarrollo del proyecto se detalla en el capítulo 5, en el cual se encontrarán no solo los procedimientos desarrollados, sino también los resultados obtenidos en las estimaciones, las concentraciones obtenidas como resultado de las mediciones con la red inalámbrica y la aplicación

del modelo de dispersión en un área determinada considerando la difusión de la concentración a través del método kernel durante su trayectoria. Las conclusiones obtenidas del desarrollo de este proyecto y los posibles trabajos futuros se pueden encontrar en el capítulo 6.

CAPÍTULO 2:
EL METANO (CH₄)

2.1. Introducción

El aire seco que da origen a la atmósfera está formado por aproximadamente 78 por ciento de nitrógeno, 21 por ciento de oxígeno y uno por ciento de argón, también existen gases traza¹ como el dióxido de carbono, el neón y el helio. Adicionalmente, existe poco vapor de agua, el cual absorbe seis veces más radiación que cualquier otro componente atmosférico por lo que es muy importante su presencia para la vida. En la Tabla 2- 1 podemos ver la composición química del aire atmosférico seco.

Tabla 2- 1. Composición química del aire seco.

Sustancia	Concentración (ppm) ¹
Nitrógeno	780.900
Oxígeno	209.400
Argón	9.300
Dióxido de carbono	315
Neón	18
Helio	5,2
Metano	2,3
Criptón	0,5
Hidrógeno	0,5
Xenón	0,08
Dióxido de nitrógeno	0,02
Ozono	0,01-0,04

¹ ppm es una abreviatura para expresar partes por millón. Para convertir una concentración expresada como ppm a otra expresada como el porcentaje de un total, se debe dividir la concentración de ppm entre 10,000.

Fuente: *Handbook of Air Pollution*, 1968.

Capas de la atmósfera

La atmósfera se divide en cuatro capas: troposfera, estratosfera, mesosfera y termósfera. La troposfera es la capa más baja y contiene casi el 75% de la masa atmosférica. Aquí se encuentran las masas de aire, frentes y tormentas que determinan el clima de la tierra, su grosor es determinado por los cambios estacionarios y casi toda la contaminación se emite en esta capa. Su transporte

¹ Un gas traza es un gas presente en baja cantidad en una mezcla, exactamente, menos de 1% por volumen de la atmósfera de la Tierra (R.K. Monson *et al.*, 2001)

está determinado por la velocidad y dirección del viento y la tasa de dispersión depende de la estructura térmica y de la agitación mecánica del aire.

2.2. Gases de efecto invernadero

Un gas de efecto invernadero (GEI) es un gas atmosférico que absorbe y emite radiación dentro del rango infrarrojo, proceso que es la causa fundamental del efecto invernadero. Los principales GEI en la atmósfera terrestre son el vapor de agua, el dióxido de carbono, el metano, el óxido de nitrógeno y el ozono. Sin los gases de efecto invernadero la temperatura promedio de la superficie terrestre sería alrededor de $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$, en lugar de la media actual de $15\text{ }^{\circ}\text{C}$. Las actividades humanas desde el inicio de la Revolución Industrial (considerado en 1750) ha producido un incremento del 40 % en la concentración atmosférica del dióxido de carbono (CO_2), desde 280 ppm en 1750 a 400 ppm en 2015. Este incremento ha ocurrido a pesar de la absorción de una gran porción de las emisiones por varios depósitos naturales que participan del ciclo del carbono.

Las emisiones de CO_2 antropogénicas (producidas por actividades humanas) provienen de la combustión de combustibles fósiles, principalmente carbón, petróleo y gas natural, además de la deforestación, la erosión del suelo y la crianza animal. En la Tabla 2- 2 se pueden apreciar los GEI que más contribuyen al calentamiento global, de los cuales, los clorofluorocarbonos (CFCs) y sus gases afines han sido prohibidos a raíz del protocolo de Montreal en 1987. Diez años después, el protocolo de Kioto buscó reducir las emisiones de los siguientes gases precursores del calentamiento global: dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4) y óxido nitroso (N_2O), adicionales a los tres gases industriales fluorados tratados en el protocolo de Montreal.

Tabla 2- 2. Los gases de efecto invernadero, sus fuentes y su contribución al calentamiento global (Echeverri et al.,2006).

Gas	Fuentes principales	Tasa de aumento actual y concentración	Contribución al calentamiento global (%)
Dióxido de carbono (CO ₂)	Combustión de combustible fósil (77%) Deforestación (23%)	0.5% (353 ppm)	55
Clorofluorocarbonos (CFCs) y gases afines (HFCs y HCFCs)	Diversos usos industriales: refrigeradores aerosoles de espuma solventes	4% (280 ppb)	24
Metano (CH ₄)	Arrozales Fermentación entérica Fugas de gas	0.9% (1.72 ppm)	15
Óxido nitroso (N ₂ O)	Quema de biomasa Uso de fertilizantes Combustión de combustible fósil	0.8% (310 ppm)	6

Respecto al CH₄, es el segundo GEI con mayor impacto después del CO₂ en términos de fuerza radiativa, lo que ha contribuido con el 20% del incremento de fuerza radiativa acumulada en la troposfera desde dicho año. Esto es debido al potencial térmico del CH₄: 28 veces mayor al del CO₂ en un periodo de 100 años, equivalente a 0.97 W/m². Adicionalmente, el CH₄ es precursor de la producción de ozono, vapor de agua estratosférico y CO₂, convirtiéndose no solo en un GEI sino también en un gas contaminante. (Marielle Sauniois, 2016)

2.3. Fuentes de generación de metano

El metano es emitido por una gran variedad de fuentes, las cuales pueden ser clasificadas por su proceso de emisión (termógeno, biogénico o pirógeno), o por su origen (antropogénico o natural). El metano biogénico es el producto final de la descomposición de materia orgánica en ambientes anaerobios, tales como campos de arroz, pantanos, sedimentos marinos, suelos inundados de agua, plantas tratadoras de agua o animales rumiantes, este último grupo es el objeto de interés de este estudio.

La Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA) reporta en sus estudios del 2010 y 2011a que el 58% de las emisiones totales de CH₄ son producidas por fuentes antropogénicas (J.R.

Knapp, 2014); de estas, varias fuentes importantes son pobremente reportadas (Marielle Saunois, 2016). Tal es el caso de los rumiantes, los cuales son la principal fuente de producción de metano entérico y cuyos reportes están basados en estimaciones de producción de metano y realmente pocos casos son monitoreados o contabilizados. Así, las principales fuentes las podemos encontrar en los países o regiones con poblaciones elevadas de ganado, cuyo grado de contaminación está en función de su nivel de producción y los sistemas de manejo de estiércol asociados.

2.4. Metanogénesis

La metanogénesis es la formación de metano por parte de los seres vivos. Es una forma de metabolismo microbiano muy importante y extendida en muchos procesos de la vida. En la mayoría de los entornos, es el paso final de la descomposición de la biomasa.

Proceso de biodigestión.

El reciclaje de materia orgánica ha recibido un fuerte impulso con el alto costo de los fertilizantes químicos, con la búsqueda de alternativas no tradicionales de energía, así como también, la necesidad de vías de descontaminación y eliminación de residuos. La población microbiana juega un papel importante en las transformaciones de estos residuos orgánicos especialmente si se considera que disponen de un amplio rango de respuestas frente a la molécula de oxígeno. Podemos identificar la metanogénesis a partir de dos procesos: la digestión aeróbica y la digestión anaeróbica.

a) Digestión aeróbica.

La digestión aeróbica consiste en procesos realizados por diversos grupos de microorganismos, principalmente bacterias y protozoos que, en presencia de oxígeno actúan sobre la materia orgánica disuelta, transformándola en productos finales inocuos y materia celular.

En contraste, los procesos de digestión anaeróbica permiten utilizar el metano generado como fuente de energía. La principal ventaja del proceso aeróbico es la simplificación en las operaciones de disposición de los lodos comparada con la relativa complejidad operativa del proceso de digestión anaeróbica.

b) Digestión anaeróbica

La digestión anaeróbica es un proceso biológico complejo y degradativo en el cual parte de los materiales orgánicos de un substrato (residuos animales y vegetales) son convertidos en biogás (conocido mejor como metano), mezcla de dióxido de carbono y metano con trazas de otros elementos, por una asociación de bacterias que son sensibles o completamente inhibidas por el oxígeno o sus precursores (e.g. H_2O_2). Utilizando el proceso de digestión anaeróbica es posible convertir gran cantidad de residuos, residuos vegetales, estiércoles, efluentes de la industria alimentaria y fermentativa, de la industria papelera y de algunas industrias químicas, en subproductos útiles. En la digestión anaerobia más del 90% de la energía disponible por oxidación directa se transforma en metano, consumiéndose sólo un 10% de la energía en crecimiento bacteriano frente al 50% consumido en un sistema aeróbico. Los microorganismos metanogénicos desempeñan la función de enzimas respiratorios y, junto con las bacterias no metanogénicas, constituyen una cadena alimentaria que guarda relación con las cadenas enzimáticas de células aeróbicas. De esta forma, los residuos orgánicos se transforman completamente en biogás que abandona el sistema. Sin embargo, el biogás generado suele estar contaminado con diferentes componentes, que pueden complicar el manejo y aprovechamiento del mismo.

Etapas de la fermentación metanogénica

Los estudios bioquímicos y microbiológicos realizados hasta ahora, dividen el proceso de descomposición anaeróbica de la materia orgánica en cuatro fases o etapas:

1. Hidrólisis
2. Etapa fermentativa o acidogénica
3. Etapa acetogénica
4. Etapa metanogénica

En la siguiente figura se muestra esquemáticamente las distintas fases del proceso de digestión anaeróbica, los microorganismos que intervienen en cada una de ellas y los productos intermedios generados.

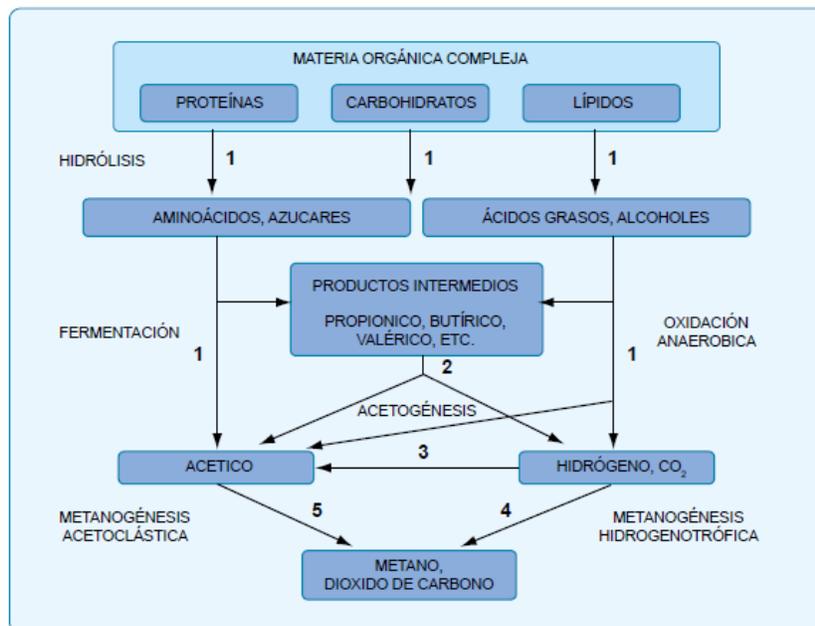


Figura 2. 1. Esquema de reacciones de la digestión anaeróbica de materiales poliméricos.

2.5. Métodos para monitorear metano entérico

En sus inicios, los métodos empleados para la medición de metano entérico estaban orientados al análisis del grado nutricional del ganado vacuno, ya que se ha demostrado en múltiples estudios que la generación de metano es inversamente proporcional con la producción láctea, así como el gasto energético del animal con base en su nivel de admisión, digestibilidad y paso del alimento. Un ejemplo de lo anterior es el trabajo presentado por J. R. Knapp *et al.* (2014) sobre la producción de metano entérico, en el cual se analiza de forma profunda el proceso metabólico del rumen, así como se proponen diversas estrategias para la mitigación del gas tal como la modificación de dieta alimenticia, ingesta diaria, complementos alimenticios aditivos y control biológico.

Existen varios métodos para determinar las emisiones de metano originadas por rumiantes, en los que se incluyen las cámaras de respiración (RC por sus siglas en inglés) y las técnicas de trazado de hexafluoruro de azufre (SF₆). Cada una de ellas tiene sus ventajas, desventajas y tienen su enfoque de aplicación y ninguna de ellas es perfecta. Por lo que es importante mencionar que independientemente del método empleado, son necesarias medidas precisas y robustas de emisiones de metano de animales individuales para los inventarios nacionales y evaluación de estrategias de mitigación. Uno de estos métodos consiste en alojar animales en RC, en un periodo de 4 días aproximadamente, permitiendo la medición directa de la emisión total de metano. Sin embargo, las RC son relativamente caras, tienen un rendimiento limitado y son perjudiciales para el comportamiento normal. Adicionalmente, no son prácticas para simular aplicaciones de pastoreo, o bien, si la dieta ofrecida es forraje fresco, ya que la selección de la dieta es limitada y los patrones de alimentación probablemente sean determinados por el régimen de alimentación.

Por otro lado, la técnica de SF₆ puede ser usada para realizar estimaciones de emisiones de metano eructado y exhalado de animales que pueden seleccionar su dieta en forma representativa de cría

de ganado (como pastoreo). Sin embargo, los collares o las canastas colectoras pueden interferir con el pastoreo del animal. Otra alternativa de esta técnica, de tipo invasivo, es la introducción de una sonda en el rumen para que rastree la trazabilidad del SF₆ al entrar en contacto con el metano entérico producido.

Otra alternativa empleada es el sistema de alimentación comercial GreenFeed presentado en 2010 como un sistema estático de medición de metano a corto plazo para ganado individual, conocido como “*Automated Head-Chamber System*” (AHCS) empleando sensores de posición de cabeza en combinación con reglas de decisión para validar la lectura efectuada. Un sistema de ventilación extrae el aire del hocico del animal hacia un colector de admisión donde es medida la tasa de flujo continuo de aire. Las mediciones se realizaban cuando el animal introducía su cabeza en el hueco que contenía el alimento para comer.

Dichos métodos han sido empleados, solos o combinados, en múltiples trabajos para obtener mediciones de CH₄ entérico. C.S. Cunha *et al.* (2016) estimaron las emisiones de gas metano empleando la técnica del hexafluoruro de azufre (SF₆), en este caso, el flujo de CH₄ exhalado por el animal se calculó en relación con el flujo de SF₆ medido como la tasa de liberación de SF₆ desde una capsula permeable introducida en el rumen y de las concentraciones de CH₄ y SF₆ en muestras de gas producidas. K.J. Hammond *et al.* (2015) realizaron un estudio comparativo de mediciones de emisión de metano empleando el sistema GF con mediciones usando cámaras de respiración (RC) o trazador de sulfuro de hexafluoruro (SF₆). P. Huhtanen *et al.* (2015) compararon en su estudio dos métodos de medición de metano entérico puntuales para determinar las emisiones de un conjunto de vacas lecheras empleando un equipo instalado en alimentadores automáticos y otro en estaciones de ordeña. En el primer método (llamado *sniffer*), las concentraciones de CH₄ y dióxido de carbono (CO₂) fueron medidas muy cerca del hocico del animal. En el segundo método,

llamado de flujo, se realizaron las mediciones de concentración a través de un flujo de aire activo dentro de los comederos para capturar el gas emitido por los rumiantes y es transportado por el flujo de aire. Hristov *et al.* (2015) realizaron su investigación empleando AHCS, bombeando una submuestra de aire de la tubería a sensores infrarrojos no dispersivos para la medición continua de CH₄ y con los datos obtenidos compararon la precisión y calidad de resultados con respecto a las RC y la técnica de SF₆.

2.6. El metano en la actualidad

En 2012 la concentración de metano (CH₄) atmosférico alcanzó 1810 ppb, el cual representó 2.5 veces más de la concentración encontrada en 1750 como resultado de la actividad humana relacionada con la agricultura, particularmente el ganado y el cultivo de arroz.

Como mencionan Cunha *et al.* (2016) en su estudio “Greenhouse gases inventory and carbon balance of two dairy systems obtained from two methane-estimation methods”, es esencial la investigación para determinar las emisiones de gases de efecto invernadero (GHG) provenientes del sector ganadero para desarrollar nuevas prácticas sustentables. Por ello, es importante contar con diversas formas de estimar y medir tanto la concentración como la dispersión del metano entérico.

J.R. Knapp (2014) plantea, como punto importante en su trabajo, una orientación más intensa de las políticas de mitigación hacia el CH₄ y N₂O, pues considera que para la industria lechera es más económico, y benéfico para el ambiente, mitigar dichas emisiones, que para los otros sectores industriales las emisiones de CO₂.

México

Los principales gases de efecto invernadero contabilizados en México son: CO₂, CH₄, N₂O y los CFC, cuya distribución se puede apreciar en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..** En 2010, el Inventario Nacional de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero reportó que las emisiones de CH₄ fueron 7,938.9 Gg de CO₂eq, lo que representa un incremento de 59.8% con respecto a 1990, cuyas principales fuentes de emisión corresponden a desechos, energía y agricultura. Siendo esta última la responsable de aportar el 43% del total de emisión de CH₄ a través de la ganadería.

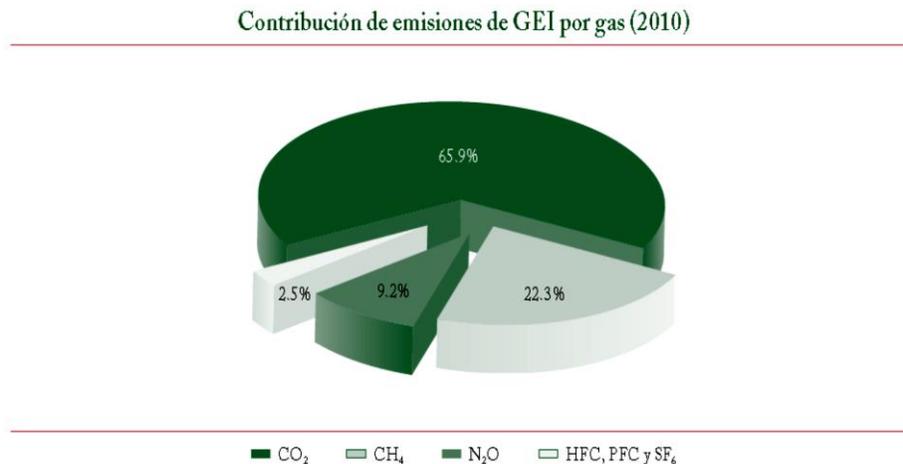


Figura 2. 2. Contribución de emisiones de GEI (2010).

En el 2013, el Inventario Nacional de Emisiones de Gases y Compuestos de Efecto Invernadero (GEyCEI) reportó que las emisiones de CH₄ provenientes de la fermentación entérica y desechos orgánicos del ganado, conocido mejor como manejo del estiércol, fue aproximadamente 51,208.129 Gg de CO₂eq. y 2,146.424 Gg de CO₂eq. respectivamente. (INECC, 2013).

La Comarca Lagunera

La Comarca Lagunera (zona metropolitana de la Laguna) es una región del norte de México resultante de la fusión de las ciudades de Torreón, Matamoros, Francisco I. Madero y San Pedro en el Estado de Coahuila y Gómez Palacio, Ciudad Lerdo, Mapimi y Tlahualilo en el Estado de Durango. El Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Información (INEGI) en el 2010 mostraba que la zona contaba con una población de alrededor de 1,215,817 habitantes en una superficie de 5,078.9 km². Según datos de la Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural (SAGARPA), en el 2012 el censo de ganado lechero en números redondos fue de 443,000 animales y de estos 249,000 estaban destinados al sector productivo.

Para el 2015, La Comarca Lagunera ocupaba el primer lugar a nivel nacional en la producción de leche, carne de ave y forrajes. El valor de la producción agropecuaria de la región ascendió a los 38 mil 600 millones de pesos, colocando a ésta zona del país en el séptimo lugar a nivel nacional. El delegado federal de la SAGARPA en la Región Lagunera de Coahuila y Durango expresó que la región tiene una producción de más de 2 mil 330 millones de litros anuales, ocupando el primer lugar a nivel nacional en la producción de leche. (SAGARPA, 2016). Por lo anterior, el realizar investigaciones que permitan muestrear la producción de metano en la región adquiere una relevancia importante.

2.7. Emisiones de metano e inventarios nacionales

El desarrollo de inventarios de GEI es importante para determinar el perfil de emisión del sector ganadero; sin embargo, el uso de inventarios en granjas continúa incipiente e insuficiente para proveer más información de las emisiones de GEI y estimaciones de la huella de carbono, es por ello, que iniciar este trabajo con estimaciones de emisión de metano es fundamental para establecer un parámetro de referencia.

Las estimaciones calculadas están basadas en la guía oficial propuesta por el Panel Intergubernamental de Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (IPCC, 2010) en el volumen IV referente a teoría y conceptos generales para elaborar inventarios verificables de emisiones de GEI en sus niveles 1 y 2 referentes a los niveles de emisión. Dichos niveles consideran dos fuentes principales de generación de metano entérico: aquellas que son producto de la digestión y aquellas producidas por gestión del estiércol.

Las emisiones producto de la digestión deben estar basadas en información esencial que pueda ser obtenida del grupo de rumiantes de estudio, a fin de poder reflejar la variación en las tasas de emisión entre un nivel y otro, así como entre especies animales, en caso de tener diversos grupos. Un paso inicial para las estimaciones es la subcategoría del ganado, las poblaciones anuales, la caracterización de la población, la ingesta y caracterización de los alimentos, etc. Adicionalmente, según el nivel de estudio que se desee desarrollar, será la precisión de la información.

Por otro lado, la descomposición del estiércol bajo condiciones anaeróbicas (es decir, en ausencia de oxígeno), durante su almacenamiento y tratamiento, produce CH_4 . Estas condiciones se dan más fácilmente cuando se gestionan grandes cantidades de animales en una superficie confinada y donde se elimina el estiércol en sistemas basados en líquidos. Se declaran las emisiones de CH_4 relacionadas con el manejo y el almacenamiento de estiércol bajo «Gestión del Estiércol». Los principales factores que inciden en las emisiones de CH_4 son la cantidad de estiércol que se produce y la porción que se descompone anaeróbicamente. La primera depende de la tasa de producción de desechos por animal y de la cantidad de animales, mientras que la segunda depende de cómo se gestiona el estiércol. Así, podremos tener estimaciones producto de la digestión que puedan ser mayores o menores con respecto a las emisiones derivadas de la gestión de los desechos.

Independientemente del método elegido, inicialmente se debe dividir la población animal en categorías que reflejen las diversas cantidades de estiércol producidas por animal. Los pasos para estimar las emisiones de CH₄ producidas por la gestión del estiércol son los siguientes: recabar datos de la población a partir de la caracterización de la población de ganado, emplear valores por defecto o desarrollar factores de emisión específicos del país para cada subcategoría de ganado en función de los kilos de metano por animal por año, multiplicar los factores de emisión obtenidos por las poblaciones de las éstas para estimar la emisión de cada subcategoría, y sumar lo de todas las subcategorías para estimar la emisión total por especie de ganado.

Pasos para definir las categorías y subcategorías de ganado

Un punto importante para obtener emisiones más precisas, consiste en basar la caracterización en los requisitos más detallados identificados para cada especie de ganado según la categoría de fuente. Podemos resumir este proceso en los siguientes pasos:

- Identificar las especies de ganado aplicables a cada categoría de fuente de emisiones.
- Revisar el método de estimación de las emisiones para cada categoría fuente pertinente.
- Identificar la caracterización más detallada requerida para cada especie de ganado.

Estimaciones de nivel 1

Este nivel es apropiado para la mayoría de las especies animales en países en los que la fermentación entérica no sea una categoría de fuente principal o donde no se disponga de datos de caracterización mejorados. En México, la fermentación entérica no se ha considerado como una fuente importante de contaminación, por lo que establecer un primer estudio de estimación de metano de nivel 1 no solo es necesario, sino esencial para sentar precedentes.

Las emisiones calculadas en este nivel se obtienen a partir de información que se puede obtener fácilmente. Los pasos que se consideran para realizar la estimación de nivel 1 son: Datos básicos de la población animal, selección de factores de emisión con base en las características del ganado del país y la emisión total.

En cuanto a las emisiones por manejo del estiércol, se consideran, además, parámetros regionales como el clima o la temperatura.

a) Emisiones de metano a partir de la fermentación entérica

El metano se produce en los herbívoros como subproducto de la fermentación entérica, un proceso digestivo por el cual los micro-organismos descomponen los carbohidratos en moléculas simples para su absorción. La cantidad de metano que se libera depende del tipo de tracto digestivo, la edad y el peso del animal, así como de la calidad y la cantidad del alimento consumido, siendo los rumiantes la fuente más importante de metano. A fin de reflejar la variación en las tasas de emisión entre las especies animales, la población de éstos debe clasificarse en subgrupos, y estimarse una tasa de emisión por animal para cada subgrupo, de forma inicial se pueden clasificar en dos subgrupos: vacas lecheras y otros vacunos. La cantidad de metano emitida por un subgrupo de la población se calcula multiplicando la tasa de emisión por animal por la cantidad de animales del subgrupo.

Los pasos desarrollados para obtener estos valores son:

- Especies y categorías de ganado: Enlistar la población de ganado que tiene valores por defecto de factores de emisión, en nuestro caso, serán únicamente vacas lecheras Holstein y otros vacunos.

- Población anual: Se deben emplear datos de la población obtenidos de estadísticas oficiales o fuentes de la industria, considerando los nacimientos y matanzas en las diferentes épocas del año. En el caso de poblaciones animales estáticas, que es el caso aquí presentado, estimar la población promedio anual puede ser tan simple como obtener datos relacionados con los del inventario anual realizado una vez. Mediante la siguiente ecuación se estima el promedio anual de la población de ganado.

$$AAP = Dias_{viva} \times \left(\frac{NAPA}{365} \right) \quad (2.1)$$

Donde: AAP= Población promedio anual, NAPA=cantidad de animales producidos anualmente.

- Vacas lecheras y producción lechera: La población de vacas lecheras se estima por separado de los demás vacunos, estas vacas se consideran como *vacas maduras* que están en producción de leche en cantidades comerciales para consumo humano. En algunos países, la población de vacas lecheras incluye dos segmentos bien definidos: a) razas de alta producción (también llamadas mejoradas) en operación comercial; y b) vacas de baja producción gestionadas con métodos tradicionales. Estos dos segmentos se pueden combinar o se los puede evaluar por separado definiendo dos categorías de vacas lecheras.
- Factores de emisión: Se seleccionan los factores de emisión que resulten más adecuados a las características del ganado del país. Los factores de emisión por defecto por fermentación entérica se han obtenido de estudios previos y están organizados por región para facilitar su uso, los factores determinados son los siguientes:

Tabla 2- 3. Factores de emisión por fermentación entérica de nivel 1 para ganado vacuno.

Características regionales	Categoría del ganado	Factor de emisión
América del Norte: sector lechero comercializado de alta productividad con alimentación de forraje y grano de alta calidad. Planteles de ganado de carne por separado, fundamentalmente a pastoreo y suplementos alimentarios estacionales. Novillos/vaquillonas para carne de rápido crecimiento terminados en corral con granos. Las vacas lecheras constituyen una pequeña parte de la población.	Vacas lecheras	121
	Otros vacunos	53

El tamaño de los animales y su producción de leche son factores determinantes importantes de las tasas de emisión en vacas lecheras. Las vacas lecheras relativamente más grandes y con altos niveles de producción se encuentran en América. El tamaño de los animales y su estructura de población son importantes factores determinantes de las tasas de emisión en otros vacunos

- Emisión total: Para estimar la emisión total, los factores de emisión seleccionados se multiplican por la población animal asociada:

$$Emisiones = EF_{(T)} \times \left(\frac{N_{(T)}}{10^6} \right) \quad (2.2)$$

y se suman:

$$Total CH_4 Entérica = \sum_i E_i \quad (2.3)$$

Donde: Emisiones son las emisiones de metano por fermentación entérica, $EF_{(T)}$ es el factor de emisión para la población de ganado definida, $N_{(T)}$ es la cantidad de cabezas de ganado de la especie/categoría T, T es la especie/categoría de ganado, $Total CH_4 Entérica$ son las emisiones totales de metano por fermentación entérica y E_i son las emisiones de las i-ésimas categorías y subcategorías de ganado.

b) Emisiones de metano producidas por la gestión del estiércol

El método de nivel 1 es un método simplificado para estimar las emisiones que sólo requiere los datos de la población de ganado por especie/categoría animal y del clima de la región o la temperatura, en combinación con los factores de emisión por defecto del IPCC. Es importante estimar la temperatura anual promedio, debido a que algunas emisiones de sistemas de gestión del estiércol dependen en gran parte de la temperatura.

Los países que emplean un método del Nivel 1 para estimar las emisiones de metano producidas por la gestión de desechos deben revisar las variables regionales de dichos cuadros para identificar la región con mayor similitud en cuanto a operaciones animales, y emplear los factores de emisión por defecto para esa región. En nuestro caso, las condiciones presentes en el caso de estudio son similares a las presentadas para la región de Norte América, por lo que los factores de emisión definidos son:

Tabla 2- 4. Factores de emisión de metano por manejo de estiércol de vacas lecheras.

Categoría	Temp. Prom. anual	Sistemas de gestión de estiércol (MCFs)		Características del ganado lechero			Factores de emisión
		Laguna	Digestor	Masa	Cap. máx de prod. de CH ₄ (B ₀)	Sólidos volátiles (VS)	
Vacas lecheras	24.5°C	79%	0%	604Kg	0.24 m ³ CH ₄ /kg VS	5.4 kg/hd/dia	95.5

Otros vacunos	24.5°C	79%	10%	389Kg	0.19 m ³ CH ₄ /kg VS	2.4 kg/hd/dia	2
---------------	--------	-----	-----	-------	--	---------------	---

Finalmente se emplea la fórmula de cálculo de emisiones de CH₄ producidas por la gestión del estiércol.

$$CH_4_{estiércol} = \sum_T \left(\frac{EF_T \times N_T}{10^6} \right) \quad (2.4)$$

Donde: $CH_4_{estiércol}$ son las emisiones de CH₄ por la gestión del estiércol, para una población definida, EF_T es el factor de emisión para la población de ganado definida y T es la especie/categoría de ganado

Estimaciones de nivel 2

Una vez que se tienen nociones “básicas” sobre la estimación de metano con un nivel 1 y se tiene acceso a información más detallada sobre la población de estudio, es recomendable realizar un estudio de nivel 2, pues este método pretende definir los animales, la productividad animal, la calidad de la dieta y las circunstancias de la gestión, a fin respaldar una estimación más exacta de la ingesta de alimentos para usarla en la estimación de la producción de metano resultante de la fermentación entérica. Las mismas estimaciones de ingesta de alimentos deben emplearse para suministrar estimaciones coherentes de las tasas de excreción de estiércol, para mejorar la exactitud y la coherencia de las emisiones de CH₄ producidas por la gestión del estiércol. Además, si consideramos que México posee una de las zonas ganaderas más importantes de América, el método de nivel 2 debe utilizarse ya que la fermentación entérica es sin lugar a dudas una fuente importante de emisiones de metano.

Las emisiones a partir de la fermentación entérica están basadas en la recopilación de información que permita desarrollar factores de emisión propios para cada subgrupo, a diferencia del nivel 1 en el que los factores están predefinidos de acuerdo a las características generales del ganado. Los pasos en este método consisten en: Recabar la información detallada de la población del ganado tal como: definiciones para subcategorías de ganado, población de ganado por subcategoría, teniendo en cuenta la estimación de la población anual según el nivel 1 y la estimación de ingesta de alimentos de un animal típico de cada subcategoría.

La población de ganado vacuno debe de clasificarse en al menos tres subcategorías principales: ganado lechero maduro, otros tipos de ganado maduro y ganado en crecimiento. Una referencia de esta clasificación se puede encontrar en la Tabla 2- 5.

Tabla 2- 5. Categorías representativas de ganado.

Categorías principales	Subcategorías
Vacas lecheras maduras	<ul style="list-style-type: none"> • Vacas de alta producción con, por lo menos, una parición y que se emplean principalmente para producción de leche. • Vacas de baja producción con, por lo menos, una parición y que se emplean principalmente para producción de leche.
Otro ganado vacuno maduro	<ul style="list-style-type: none"> • Vacas usadas para más de un propósito productivo: leche, carne, tiro
Ganado vacuno en crecimiento	<ul style="list-style-type: none"> • Terneros antes del destete • Vaquillonas lecheras de reemplazo • Ganado vacuno en crecimiento / de engorde post-destete • Ganado alimentado a corral con dietas con un contenido >90% de concentrados

Para cada una de las categorías de animales representativas definidas, se requiere la población anual promedio, la ingesta de alimento diaria promedio, factor de conversión a metano en relación al porcentaje de energía alimentaria convertida en metano. Debido a que es difícil obtener datos sobre la ingesta de alimento diario promedio, se recaba la siguiente información general para estimar dicha cantidad de cada una de las categorías de animales representativas:

- Peso, relacionado al peso vivo para cada subcategoría animal. Estos datos deben obtenerse de estudios de muestras representativas o de bases de datos estadísticas si es que ya existen. En el ganado vacuno es necesario contar con el promedio anual de peso para cada categoría de animales.
- Aumento de peso promedio por día. Por lo general, se recopilan los datos del aumento de peso promedio para animales alimentados a corral y para animales jóvenes en crecimiento. Los animales maduros no experimentan aumento ni pérdida de peso en todo un año.
- Peso maduro. Se requiere que el peso maduro del animal adulto del grupo inventariado defina una pauta de crecimiento, incluyendo el alimento y la energía requeridos para el crecimiento. Se tiene establecido como peso maduro el peso corporal que han alcanzado los animales cuando se ha completado el desarrollo óseo.
- Situación alimentaria. Se debe determinar la situación alimentaria que mejor representa la subcategoría de animales empleando la siguiente Tabla 2- 6.

Tabla 2- 6. Coeficientes de actividad correspondientes a la situación alimentaria de los animales.

Situación	Definición	C_a
Compartimento	Los animales están confinados en una pequeña superficie (es decir, amarrados, en caballerizas, en establo) de lo que resulta que gastan muy poca o ninguna energía en procura de alimento.	0.0
Pastura	Los animales están confinados en áreas con suficiente forraje, lo que exige un escaso gasto de energía en procura del alimento.	0.17
Grandes superficies de pastoreo	Los animales pastan a campo abierto o en terrenos accidentados y gastan una cantidad significativa de energía en procura de su alimento.	0.36

- Temperatura media invernal. En los modelos detallados de ingesta alimentaria se consideran la temperatura ambiente, la velocidad del viento, el aislamiento por pelo y tejidos, y el calor de la fermentación, más relacionados con un estudio de nivel 3. Para el

estudio de nivel 2 se sugiere ajustar el término C_{fi} de la ecuación (5) relacionado con los requisitos de mantenimiento del ganado alimentado a corral abierto y climas más fríos.

- Promedio diario de producción de leche. El promedio diario de producción debe calcularse dividiendo la producción anual total por 365, o declararse como promedio de producción diaria junto con los días de lactancia por año, o estimarse empleando la producción por temporada dividida por la cantidad de días de la temporada.
- Contenido graso. Es necesario conocer el contenido graso promedio de la leche para las vacas.
- Porcentaje de hembras que paren y cantidad de crías producidas por año.
- Digestibilidad de alimentos (DE%). La parte de energía bruta (GE, del inglés, *gross energy*) contenida en el alimento que no se excreta con las heces se conoce como alimento digerible. Generalmente la digestibilidad se expresa como porcentaje de GE o total de nutrientes digeribles (TDN, del inglés *total digestible nutrients*). Ese porcentaje de alimento que no se digiere representa el % de la ingesta de materia seca que se va a excretar en forma de heces. Los valores típicos de digestibilidad para el ganado vacuno y tipos de dietas se presentan en la Tabla 2- 7 como orientación.

Tabla 2- 7. Digestibilidad alimentaria representativa para los vacunos y otros rumiantes.

Categoría	Clase	Digestibilidad (DE%)
Vacunos y otros rumiantes	- Animales de corral alimentados con >90% de dieta concentrada	75 – 85 %
	- Animales alimentados con pasturas	55 – 75%
	- Animales alimentados con forraje de baja calidad	45 – 55%

Las variaciones en la digestibilidad de la dieta provocan variaciones importantes en la estimación del alimento necesario para satisfacer los requisitos de los animales y, en consecuencia, en las respectivas emisiones de metano y cantidades de estiércol excretadas. Los datos sobre digestibilidad deben basarse en valores medidos de los alimentos y forrajes dominantes en el consumo del ganado, considerando las variaciones estacionales.

Calculo de la energía bruta (GE)

Los datos sobre el comportamiento y la dieta animal se emplean para estimar la ingesta de alimentos, es decir, la cantidad de energía que necesita un animal para su mantenimiento y para actividades tales como el crecimiento, la lactancia y la preñez. Para ello se emplean las siguientes ecuaciones para encontrar dicha estimación.

Las ecuaciones utilizadas para calcular la GE son las siguientes:

- Mantenimiento (NE_m):

$$NE_m = C_{fi} \times (Peso)^{0.75} \quad (2.5)$$

Donde: NE_m es la energía neta requerida por el animal para su mantenimiento, C_{fi} es el coeficiente que varía para cada categoría de animales, en el caso de los vacunos lecheros, su valor es de 0.32 para vacas no en lactancia y 0.386 para vacas en lactancia. Peso corresponde al peso vivo del animal.

- Actividad (NE_a):

$$NE_a = C_a \times NE_m \quad (2.6)$$

Donde: NE_a es la energía neta para la actividad animal, C_a es el coeficiente correspondiente a la situación alimentaria del animal, valor obtenido de la Tabla 2- 6. NE_m es la energía neta requerida por el animal para su mantenimiento.

- Crecimiento (NE_g):

$$NE_g = 22.02 \times \left(\frac{BW}{C \times MW} \right) \times WG^{1097} \quad (2.7)$$

Donde: NE_g es la energía neta para el crecimiento, BW es el peso corporal vivo promedio de los animales de la población, C es un coeficiente con un valor de 0.8 para hembras. MW es el peso corporal vivo y maduro de una hembra adulta en condición corporal moderada y WG es el aumento de peso diario promedio de los animales de la población.

- Lactancia (NE_l):

$$NE_l = Leche \times (1.47 + 0.4 \times Grasa) \quad (2.8)$$

Donde: NE_l es la energía neta para la lactancia, $Leche$ es la cantidad de leche producida y $Grasa$ es el contenido graso de la leche.

- Preñez (NE_p):

$$NE_p = C_{preñez} \times NE_m \quad (2.9)$$

Donde: NE_p es la energía neta para la preñez, $C_{preñez}$ es el coeficiente de preñez, para el caso de los vacunos su valor es de 0.10, y NE_m es la energía neta requerida por el animal para su mantenimiento.

- Relación entre la energía neta disponible en la dieta para mantenimiento y la energía digerible consumida (REM, del inglés *ratio energy maintenance*)

$$REM = \left[1123 - (4,092 \times 10^{-3} \cdot DE\%) + [1,126 \times 10^{-5} \cdot DE\%] - \left(\frac{25.4}{DE\%} \right) \right] \quad (2.10)$$

Donde: REM es la relación entre la energía neta disponible en una dieta para mantenimiento y la energía digerible consumida y $DE\%$ es la energía digerible expresada como porcentaje de la energía bruta.

- Relación entre la energía neta disponible en la dieta para crecimiento y la energía digerible consumida (REG , del inglés *ratio energy growth*)

$$REG = \left[1164 - (5,160 \times 10^{-3} \cdot DE\%) + [1,308 \times 10^{-5} \cdot (DE\%)^2] - \left(\frac{37.4}{DE\%} \right) \right] \quad (2.11)$$

Donde: REG es la relación entre la energía neta disponible para crecimiento y la energía digerible consumida y $DE\%$ es la energía digerible expresada como porcentaje de la energía bruta.

- Energía bruta:

$$GE = \left[\frac{\left(\frac{NE_m + NE_a + NE_l + NE_p}{REM} \right) + \left(\frac{NE_g}{REG} \right)}{100} \right] \quad (2.12)$$

Donde: NE_m es la energía neta requerida por el animal para su mantenimiento, NE_a es la energía neta para la actividad animal, NE_g es la energía neta para el crecimiento, NE_l es la energía neta para la lactancia, NE_p es la energía neta para la preñez, REM es la relación entre la energía neta disponible en una dieta para mantenimiento y la energía digerible consumida, REG es la relación entre la energía neta disponible para crecimiento y la energía digerible consumida, y $DE\%$ es la energía digerible expresada como porcentaje de la energía bruta.

Ingesta de materia seca

También es posible predecir la ingesta de materia seca en ganado maduro y en crecimiento sobre la base del peso corporal del animal y la concentración del alimento NE_{ma} (NRC, 1996) o DE%. La concentración dietaria NE_{ma} puede oscilar entre los 3,0 y 9,0 MJ kg^{-1} de materia seca. Los valores típicos de las dietas altas, moderada y baja calidad se presentan en la Tabla 2- 8.

Tabla 2- 8. Ejemplos de contenido de NE_{ma} de las dietas típicas con que se alimenta al ganado vacuno.

Tipo de dieta	NE_{ma}
Dieta alta en granos >90%	7.5 – 8.5
Forraje de alta calidad (p. ej., leguminosas y hierbas)	6.5 – 7.5
Forraje de moderada calidad (p. ej., leguminosas y hierbas de media estación)	5.5 – 6.5
Forraje de baja calidad (p. ej., paja, hierbas maduras)	3.5 – 5.5

Fuente: Estimaciones obtenidas a partir de modelos predictivos en NCR (1996); la NE_{ma} también se puede estimar utilizando la siguiente ecuación: $NE_{ma} = REM \times 18,45 \times DE\% / 100$.

La ingesta de materia seca en ganado en crecimiento y en terminación se estima utilizando la siguiente ecuación:

$$DMI = BW^{0.75} \cdot \left[\frac{0.2444 \times NE_{ma} - 0.0111 \times NE_{ma}^2 - 0.472}{NE_{ma}} \right] \quad (2.13)$$

La ingesta de materia seca en ganado maduro se estima utilizando la siguiente ecuación:

$$DMI = BW^{0.75} \cdot \left[\frac{0.0119 \times NE_{ma}^2 + 0.1938}{NE_{ma}} \right] \quad (2.14)$$

Donde: DMI es la ingesta de materia seca, BW es el peso corporal en pie y NE_{ma} es la concentración de energía neta dietaria estimada o valores por defecto, obtenidos de Tabla 2- 8.

Al igual que las estimaciones por digestión, las emisiones por manejo del estiércol requieren más información detallada sobre las características de los animales y las prácticas de gestión del estiércol de acuerdo a las condiciones del país. En este caso, el estudio del estiércol incluye la cantidad de sólidos volátiles (VS) con base en la ingesta alimentaria y la digestibilidad, y la cantidad máxima de metano que puede producir ese estiércol (B_0) a partir del sistema implementado para su gestión. Al igual que la gestión de nivel 1, la temperatura es esencial para determinar los factores de emisión.

a) Emisiones de metano a partir de la fermentación entérica

El método de nivel dos es un método más complejo que requiere datos detallados y específicos del país referido a ingesta de energía bruta y a factores de conversión en metano para categorías específicas de ganado. Debe utilizarse si la fermentación entérica es una categoría de fuente principal para la categoría de animales que representa una gran parte de las emisiones totales del país. Se aplica a categorías de población de ganado más desagregadas y se emplea para calcular factores de emisión y no valores por defecto. Los principales elementos a considerar en cuanto al método de Nivel 2 son el desarrollo de factores de emisión y la recopilación de datos detallados de la actividad.

Los pasos desarrollados para obtener estos valores son:

- Población de ganado: Deben clasificarse en, por lo menos, tres subcategorías principales: ganado lechero maduro, otros tipos de ganado maduro y ganado en crecimiento. Se puede

considerar la Tabla 2- 5 como apoyo o guía para la clasificación. En el caso de estudio, la población se clasifico como se muestra en la Tabla 2- 9.

Tabla 2- 9. Clasificación de la población para el método de nivel 2.

Categoría	Características
Vaquillas prepubertas	Hembras con peso menor a 200 kg
Vaquillas preñadas	Hembras maduras que están en su primer preñez con un peso entre 200 y 400 kg
Vaquillas maduras	Hembras que ya han tenido su primer preñez y tienen un peso de 400 a 600 Kg (con una producción promedio de 18 litros de leche/día)
Vacas lecheras de alta producción	Hembras que tienen una producción de al menos 19 litros de leche/día en promedio
Vacas de baja producción	Hembras maduras que tienen una producción promedio de 12 litros/día
Vacas secas	Hembras maduras cuya producción está cercana o por debajo de 12 lts/día y que empiezan a presentar pérdida de peso

Factores de emisión

Los factores de emisión se estiman para cada categoría animal empleando los datos de la población del ganado, descritos al inicio de esta sección. Con base en la ingesta de energía bruta y el factor de conversión a metano correspondientes a la categoría para obtener los siguientes factores:

- Factor de conversión de CH₄ (Y_m):

El grado en el que la energía de los alimentos se convierte en CH₄ depende de varios factores alimentarios y animales interrelacionados. Al no existir factores de conversión derivados de trabajos de investigación previos, se emplea lo siguiente:

Tabla 2- 10. Factores de conversión de CH₄.

Categoría de ganado	Factor de conversión de CH₄ para vacunos (Y_m)
Lecheras y su progenie	6.5% ± 1%

Cuando se dispone de buena alimentación (es decir, con alta digestibilidad y altos valores de energía), deben utilizarse los límites inferiores. Cuando se dispone de alimentación más pobre, resultan más apropiados los límites superiores. Se supone que el factor de conversión de CH₄ para todos los animales que sólo consumen leche (es decir, corderos y terneros alimentados a leche) equivale a cero.

- Desarrollo de factores de emisión:

Se debe desarrollar un factor de emisión para cada categoría de animales siguiendo la siguiente ecuación:

$$EF = \left[\frac{GE \times \left(\frac{Y_m}{100} \right) \times 365}{55.65} \right] \quad (2.15)$$

Donde: EF es el factor de emisión, GE es la ingesta de energía bruta, Y_m es el factor de conversión en metano, porcentaje de la energía bruta del alimento convertida en metano.

- Emisiones totales:

Los factores de emisión seleccionados se multiplican por la población animal asociada y se suman. Las estimaciones de emisiones deben declararse en gigagramos (Gg).

b) Emisiones de metano producidas por la gestión del estiércol

Este método requiere información detallada sobre las características de los animales y las prácticas de gestión del estiércol, la que se emplea para desarrollar factores de emisión específicos para las condiciones del país.

El método de Nivel 2 se basa en dos tipos fundamentales de entradas que inciden sobre el cálculo de los factores de emisión de metano del estiércol:

- Las características del estiércol: Incluye la cantidad de sólidos volátiles (VS) producida en el estiércol y la cantidad máxima de metano que puede producir ese estiércol (B_o).
- Características del sistema de gestión del estiércol: Incluye los tipos de sistemas empleados para gestionar el estiércol y un factor de conversión de metano específico del sistema (MCF, del inglés methane conversion factor) que refleja la porción de B_o que se está logrando. Los sistemas presentes en el caso de estudio se muestran en la Tabla 2- 11.

Tabla 2- 11. Sistemas de gestión de estiércol presentes en el caso de estudio.

Sistema	Definición
Camas profundas para vacunos	A medida que el estiércol se acumula, se agrega constantemente material de cama para absorber la humedad durante un ciclo de producción y, posiblemente, durante hasta 6 a 12 meses. A este sistema de gestión del estiércol se le conoce también como sistema de gestión del estiércol de estabulado con cama y se puede combinar con engorde en corral o pastura.

Digestor anaeróbico	Las excretas animales con o sin paja se recogen y se resumen anaeróbicamente en un gran tanque contenedor o en una laguna cubierta. En general, los digestores se diseñan y operan para la estabilización de los desechos mediante la reducción microbiana de compuestos orgánicos complejos de CO ₂ y CH ₄ , que se capturan y queman o se usan como combustible.
---------------------	--

El desarrollo de factores de emisión de Nivel 2 implica determinar un MCF promedio ponderado empleando las estimaciones del estiércol gestionado por cada sistema de desechos. Entonces, el MCF promedio se multiplica por la tasa de excreción de VS y por B_o de las categorías de ganado. En forma de ecuación, la estimación es la siguiente:

$$EF_{(T)} = (VS_{(T)} \times 365) \times \left[B_{o(T)} \times 0.67 \times \sum_S \frac{MCF_{S,k}}{100} \times MS_{(T,S)} \right] \quad (2.16)$$

Donde: $EF_{(T)}$ es el factor de emisión anual de CH₄ para la población de ganado categoría T , $VS_{(T)}$ son los sólidos volátiles excretados por día en la categoría de ganado T , $B_{o(T)}$ es la capacidad máxima de producción de metano del estiércol producido por el ganado de la categoría T , 0.67 es el factor de conversión de m³ de CH₄ a kilos de CH₄, $MCF_{S,k}$ son los factores de conversión de metano para cada sistema de gestión del estiércol S y $MS_{(T,S)}$ es la fracción del estiércol del ganado de la categoría T manejado usando el sistema de gestión de desechos S .

- Tasas de excreción de VS

Los sólidos volátiles (VS) constituyen el material orgánico del estiércol animal y consisten en fracciones tanto biodegradables como no-biodegradables. La mejor manera de obtener las tasas diarias de excreción de VS es usando datos de fuentes de publicación nacional. Si no se dispone de las tasas diarias de excreción de VS, se puede

estimar las específicas del país a partir de los niveles de ingesta alimentaria. El contenido de VS del estiércol equivale a la fracción de la dieta consumida que no se digiere y que, por ende, se excreta como materia fecal y, que, combinada con las excreciones urinarias, constituye el estiércol.

Una vez estimados estos valores, la tasa de excreción de VS se estima como sigue:

$$VS = \left[GE \cdot \left(1 - \frac{DE\%}{100} \right) + (UE \cdot GE) \right] \times \left[\frac{1 - ceniza}{18.45} \right] \quad (2.17)$$

Donde: *VS* es la excreción de sólidos volátiles por día en base a materia orgánica seca, *GE* es la ingesta de energía bruta, *DE%* es la digestibilidad del alimento en porcentaje, *UE · GE* es la energía urinaria expresada como fracción de la GE. Habitualmente, se puede considerar una excreción de energía urinaria de 0,04 GE para la mayoría de los rumiantes. *Ceniza* es el contenido de ceniza del estiércol calculado como fracción de la ingesta alimentaria de materia seca, en nuestro caso, el valor es 0,08 para vacunos. 18.45 es el factor de conversión para GE dietaria por kg de materia seca.

- Valores de B_o

La capacidad máxima de producción de metano del estiércol (B_o) varía según las especies y la dieta. Los valores de B_o empleados en este caso se pueden ver en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..**

- MCF

En la Tabla 2- 4 se suministran los factores de conversión de metano (MCF) por defecto para los sistemas de gestión presentes en el caso de estudio y según las temperaturas anuales promedio. Estos valores se determinan para un sistema específico de gestión

del estiércol y representan el grado en el que se logra B_0 . La cantidad de metano se ve afectada por el grado en que se encuentren presentes las condiciones anaeróbicas, la temperatura del sistema y por el tiempo de retención del material orgánico en el sistema. Es importante que se deban realizar mediciones de campo para cada región climática a fin de reemplazar los valores de MCF por defecto. En las mediciones se deberán incluir los siguientes factores: Características de los alimentos y de los animales en el lugar de la medición, duración del almacenamiento, características del estiércol, determinación de la cantidad de estiércol que queda en las instalaciones de almacenamiento, distribución temporal y de temperatura entre el almacenamiento en interior y al aire libre y fluctuación diaria de la temperatura.

CAPÍTULO 3:
REDES INALÁMBRICAS DE SENSORES (WSN)

3.1. Introducción

La investigación en química atmosférica ha sido durante mucho tiempo un semillero de invención para tecnologías de detección y métodos de análisis (Lewis, A. *et al.*, 2016). Por lo que la calidad del aire ha sido un tema de interés constante al vincularse con la calidad de vida, siendo la exposición prolongada al aire contaminado causa de problemas permanentes de salud. Según los resultados mostrados en diversos estudios los peligros graves de salud han aumentado significativamente, tales como enfermedades cardíacas, aterosclerosis, mortalidad respiratoria y oncológica, enfermedad pulmonar obstructiva crónica (EPOC) y cáncer de pulmón (Wei, Y., *et al.* (2015), Kheirbek, I., *et al.* (2013), Yori-fuji, T., *et al.* (2015), Rainham, D., (2016). Lewis, A. & Edwards, P. (2016) relacionan la mala calidad del aire con más de tres millones de muertes cada año, y el 96% de las personas en las grandes ciudades están expuestas a niveles de contaminantes que están por encima de los límites recomendados. Lo anterior ha provocado que el riesgo de exposición en ambientes exteriores se convirtiera en un problema importante (Wen, T-H., *et al.*, 2013). Los riesgos de salud y la exposición a altas concentraciones de gases han sido informados en múltiples estudios, por ejemplo, Ma, Y *et al.* (2008), Wen, T-H., *et al.*, (2013), Kheirbek, I. *et al.* (2013), Yorifuji T *et al.* (2015), Devarakonda, S. *et al.* (2013).

En la Tabla 3 - 1 se mencionan los contaminantes más comunes encontrados en algunas ciudades, las fuentes que los originan y sus efectos sobre el organismo.

Tabla 3 - 1. Contaminantes del aire y sus efectos en el cuerpo humano, Choi, S., et al. (2009).

Categoría	Fuentes	Efectos
CO	Calentadores de gas, chimeneas y hornos con fugas, estufas de leña.	Deterioro de la visión y la coordinación, dolores de cabeza, mareos, confusión, náusea.
NO ₂	Calentadores de queroseno, estufas de gas sin ventilación, calentadores, humo de tabaco.	Irritación de ojos, nariz y garganta, deterioro de la función pulmonar, aumento de infecciones respiratorias.
Material particulado (PM)	Chimeneas, humo de tabaco, estufas de leña, calentadores de queroseno.	Irritación de ojos, nariz y garganta, bronquitis, cáncer de pulmón.
CO ₂	Calentadores de gas, humo de tabaco, estufas de leña, chimeneas, estufas de gas, productos automotrices.	Estimulación del centro respiratorio, mareos, confusión, dolores de cabeza, dificultad para respirar.
Compuestos orgánicos volátiles (VOCs)	Pinturas, decapantes, aerosoles, ambientadores, combustibles almacenados, productos automotrices, ropa para lavar en seco.	Irritación de ojos, nariz y garganta, dolores de cabeza, pérdida de coordinación, náuseas, daño al hígado, riñones y sistema nervioso central.

La mayoría de los contaminantes gaseosos, como el dióxido de nitrógeno (NO₂) y el ozono (O₃), se producen a niveles de partes por billón en el aire y se mezclan con miles de otros compuestos. Por mencionar un caso, se informó que los volúmenes de partículas y la oxidación de nitrógeno en Londres eran más altos que las limitaciones declaradas en los estándares de calidad del aire, Lewis *et al.* (2016). Así mismo se han presentado estudios en Hong Kong (Yi, W *et al.*, 2015), Taiwán (Wen, T.-H. *et al.*, 2015), Torino (Velasco A. *et al.*, 2016), Nueva Escocia (Rainham *et al.*, 2016) y Bangkok (Pummakarnchana *et al.*, 2005), por mencionar otros casos. Sin lugar a dudas, el transporte tiene un impacto significativo sobre el entorno en el que vivimos (Ma, Y *et al.* (2008), Rainham, Daniel. (2016)), tal como lo menciona Daniel Jian Sun *et al.* (2016) en su trabajo “*Modeling carbon emissions from urban traffic system using mobile monitoring*” al hacer referencia al Reporte Mundial de Energía en el que predijo que las emisiones de carbono relacionadas con el tráfico urbano aumentarían a una tasa anual de 1.7% de 2010 a 2030, mientras que la tasa anual de crecimiento de las emisiones de carbono relacionadas con el tráfico en los

países en desarrollo y países moderadamente desarrollados, se proyectan en 3.4% y 4.2%, respectivamente.

Una forma de controlar la situación de la contaminación del aire es mediante sistemas convencionales de monitoreo de la contaminación del aire empleando monitores fijos. Estas estaciones de monitoreo son altamente confiables, precisas y capaces de medir una amplia gama de contaminantes mediante el uso de instrumentos analíticos convencionales, por ejemplo, cromatógrafos de gases y espectrómetros de masas. Los inconvenientes que presentan este tipo de dispositivos son su gran tamaño, alto peso y costos extraordinarios, cuya actualización de sus mediciones de contaminación se realiza cada hora o incluso cada día (Choi, S (2009), Wen, T-H., *et al.*, (2013)). Por lo que es necesario que la información sobre la contaminación del aire esté disponible a la brevedad de tiempo para que pueda ayudar al público a tomar las medidas pertinentes de acuerdo con sus necesidades individuales de salud (Yi, W *et al.*, 2015). En las últimas décadas, los investigadores que desean realizar trabajos enfocados a las concentraciones de contaminantes en las zonas urbanas dependen de campañas de monitoreo ofrecidas por el gobierno que consisten en pocos monitores para grandes áreas geográficas (Pummakarnchana, O *et al.*, 2005) por lo que era necesario contar con una alternativa que ofreciera mayores ventajas en cuanto a portabilidad, temporalidad y espacio. Esta necesidad fue cubierta con la creación de redes inalámbricas de sensores, conocidas como wireless sensor networks.

3.2. Redes Inalámbricas de Sensores (WSN Wireless Sensor Networks)

El desarrollo de sistemas de monitoreo basados en redes inalámbricas de sensores, se ha aplicado en muchos sectores con el fin de ayudar a las personas en su trabajo, reduciendo los costos y el tiempo de muestreo. Por ejemplo, esto se ha incrementado rápidamente en monitoreo agrícola para la medición de crecimiento de plantas y control de humedad, por mencionar algunos casos;

monitoreo de hábitat para control y medición de condiciones como temperatura y luminosidad; monitoreo en interiores considerando las condiciones de confort, luminosidad y seguridad interior; monitoreo de invernadero para regular humedad, luminosidad solar; monitoreo del clima para pronóstico del tiempo y monitoreo forestal para control de incendios (Mohd Fauzi *et al.*, 2012).

Uno de los inconvenientes que presentan los equipos necesarios para cumplir con los estándares establecidos por las regulaciones de la mayoría de los países en cuanto a mediciones de concentraciones de gases tiene un alto costo de adquisición y mantenimiento (Velasco A., *et al.*, 2016). Estos enfoques tradicionales limitan la posibilidad de explorar las variaciones espacio-temporales a escala fina para la medición de presencia de los contaminantes atmosféricos en el entorno de las calles y la exposición a la contaminación del aire durante la congestión del tráfico, ejemplo de lo anterior, son los trabajos presentados por Wen, T.-H. *et al.* (2015), Rainham, D. *et al.* (2016) y Pummakarnchanaa, O., *et al.* (2005).

Recientemente se han desarrollado con mayor auge sistemas de sensado inalámbrico y redes inalámbricas de sensores como consecuencia de la ingeniería aplicada a la reducción de dispositivos sensores caracterizados por un bajo costo de fabricación y un consumo energético bajo (Oikonomou, P., *et al.* (2016)). Estos dispositivos presentan sensibilidad, exactitud y precisión aceptables que pueden ser empleadas, bajo ciertas condiciones estables como una calibración adecuada, en sustitución de los equipos pesados, voluminosos, costosos y “lentos” que forman los equipos tradicionales.

Una WSN consiste en sensores espacialmente distribuidos, por ejemplo, para monitorear condiciones ambientales, como la temperatura, el ruido y la contaminación del aire en un área de cobertura determinada. Los sensores, llamados "nodos" o "motas", generalmente constan de cinco componentes clave: el sensor, un microcontrolador, un transceptor, una memoria y una fuente de

alimentación (Bogue, R., 2012), y según su configuración de comunicación pueden pasar sus datos cooperativamente a través de la red inalámbrica al nodo coordinador, o también llamado maestro, y de ahí a un servidor que contenga la base de datos principal o la aplicación vinculada al monitoreo (Wen, T.-H., 2013). En la Figura 3. 1 se pueden apreciar dos ejemplos de topologías empleadas en las WSN en los trabajos presentados por P. Oikonomou *et al.* (2016) y Mohd Fauzi Othman *et. al* (2012).

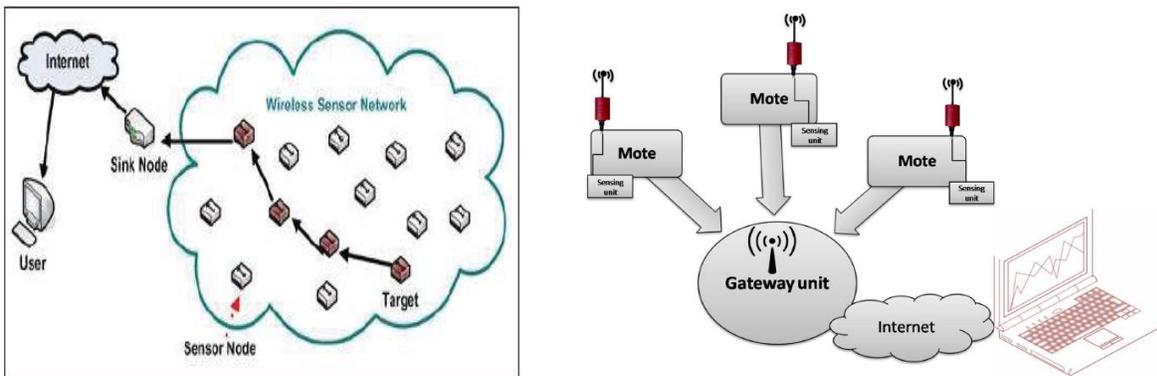


Figura 3. 1. Ejemplos de topologías que pueden emplearse en una WSN

La gama de aplicaciones de WSN es muy amplia e incluye agricultura inteligente; seguridad y vigilancia de equipos, edificios y procesos industriales; monitoreo de la salud enfocado a aplicaciones médicas como monitoreo cardíaco y adquisiciones de señales de ECG; monitoreo del tráfico; control y monitoreo industrial como logística y transporte de procesos; así como acciones militares, y sistemas de monitoreo ambiental (Dziadak, B. *et al.* (2016), Cuevas-Martinez, J. C. *et al.* (2010), I.F. Akyildiz *et al.* (2002)). Varios experimentos han demostrado la viabilidad de redes inalámbricas de sensores para aplicaciones de monitoreo ambiental, incluyendo el monitoreo de las condiciones climáticas para predecir la calidad de los productos agrícolas y el monitoreo de las condiciones ambientales en las áreas urbanas (Rainham, D. *et al.*, 2016).

Las WSN de bajo costo se pueden usar como una plataforma independiente o como una complementaria a los sistemas existentes. Es por ello que las WSN de bajo consumo energético han demostrado ser confiables para el monitoreo ambiental (Velasco A., *et al.*, 2016). Hay que considerar que la implementación de grandes cantidades de sensores de bajo costo en una red inalámbrica puede aumentar el área de cobertura y la distribución espacial de los sistemas de monitoreo, especialmente si están montados en plataformas móviles (Devarakonda, S. *et al.*, 2013).

Desarrollar una red de sensores sobre una región objetivo enfrentará muchos desafíos. Estos incluyen desarrollar y ampliar la red de e-Science, unidades de sensor y tecnologías de comunicación y modelado para permitir la integración de datos de redes de sensores ambientales fijos y móviles heterogéneos en tiempo real para proporcionar estimaciones dinámicas de contaminantes y concentraciones de riesgo (Ma, Y *et al.*, 2008). Además, en diversos estudios se sugiere que las WSN tengan las siguientes propiedades para poder desarrollar aplicaciones de monitoreo: a) autonomía desde el punto de vista energético, es decir, que la batería empleada trabaje adecuadamente y proporcione energía suficiente durante el funcionamiento de la red ya que el transmisor de radio es el dispositivo que más energía consume, b) fiabilidad para el manejo simple y operaciones predecibles necesarias para evitar problemas inesperados del sistema, c) robustez, ya que la red debe de ser capaz de identificar problemas como una falla de hardware o una señal de conectividad pobre y poder darle solución al problema, y d) flexibilidad para que el usuario sea capaz de agregar, remover o cambiar nodos en cualquier momento dependiendo de los requerimientos de las estaciones (Mohd Fauzi *et al.*, 2012). Por otro lado, I.F. Akyildiz *et al.* (2002) mencionan que el diseño de una WSN está determinado por diversos factores, entre los cuales mencionan: tolerancia a fallos, escalabilidad, costos de producción, entorno operativo, topología

de la red del sensor, restricciones de hardware, medios de transmisión para la comunicación; y consumo de energía.

En 2015, Hasenfratz, D. en su tesis doctoral “Enabling Large-Scale Urban Air Quality Monitoring with Mobile Sensor Nodes”, y posteriormente referenciado por Wei Ying Yi *et al.* en 2015, se propone una forma de agrupar las WNS de acuerdo a su capacidad de medición, detección participativa de los dispositivos y orden de espacio-temporal de la información medida sobre la contaminación del aire, combinando los sensores ambientales portátiles de bajo costo y las WSN en un sistema que es conocido como The Next Generation Air Pollution Monitoring System (TNGAPMS, por sus siglas en inglés), El Sistema de Monitoreo para la Contaminación del Aire de Próxima Generación. Como se puede apreciar en la Figura 3. 2, TNGAPMS clasifica las redes de monitoreo en cuatro categorías basadas en la posición de los transportadores de los nodos sensores, esto es: Red de Monitoreo Convencional Estacionaria (CSMN, por sus siglas en inglés), Red Estática de Sensores (SSN, por sus siglas en inglés), Red Comunitaria de Sensores (CSN, por sus siglas en inglés) y Red Automóvil de Sensores (VSN, por sus siglas en inglés) vehículo.

A continuación, se da una breve descripción de los diferentes grupos en los que se clasifican las WSN y se mencionan algunos trabajos reportados que se han clasificado en dichos grupos. Si bien los autores de dichos trabajos no los clasifican en estas categorías, al analizar los elementos empleados y su configuración coinciden en algún grupo de la clasificación propuesta por Wei Ying Yi (2015).

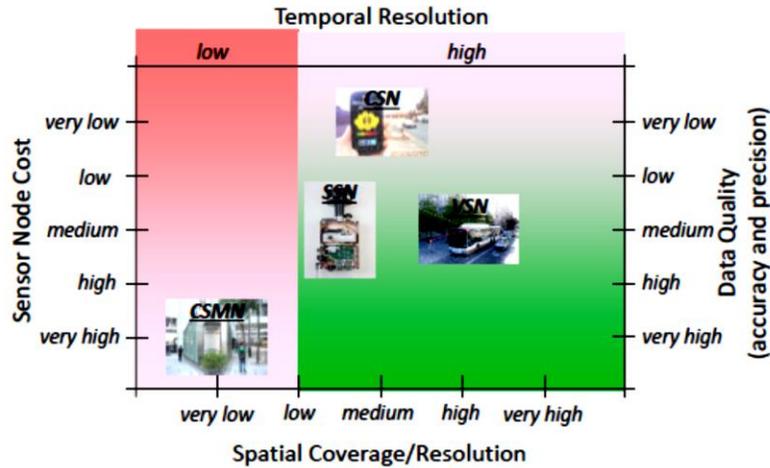


Figura 3. 2. Relación entre el costo del nodo del sensor, la cobertura espacial/resolución, calidad de la medición y resolución temporal de las WSN (Yi, 2015).

a) Red de Monitoreo Convencional Estacionaria (CSMN, por sus siglas en inglés). - Este tipo de redes está formada por equipos robustos, costosos y con una alta precisión para la medición de la calidad del aire. Los datos obtenidos corresponden a un área limitada de cobertura y generalmente son mostrados en horas posteriores a la lectura o incluso días después ya que los dispositivos no pueden desplazarse, así mismo, la necesidad energética de los sensores de medición es alta. Los sensores empleados generalmente son equipos ópticos tipo cromatógrafos, espectroscópicos o infrarrojos, Este tipo de equipos son empleados para calibrar sensores o comparar mediciones realizadas en los otros tipos de redes de monitoreo, por ejemplo, los trabajos desarrollados por Velasco A. *et al.* (2016), Wen, T-H., *et al.*, (2013), Dziadak, B. *et al.* (2016) y Y. Wang *et al.* (2017) cumplen con las características previamente mencionadas.

b) Red Estática de Sensores (SSN, por sus siglas en inglés). - En este tipo de sistemas, los nodos sensores están generalmente montados en estructuras laterales de las vialidades, tales como postes, semáforos o paredes. Los elementos empleados son sensores de bajo costo, en su mayoría

son de estado sólido o electroquímicos, por lo que es posible incorporar una mayor cantidad de elementos en los nodos en comparación con los CSMN. Esto permite que haya una mayor cobertura espacio-temporal teniendo información autorizada de contaminación de aire disponible al público a través de páginas web, aplicaciones web y móviles. Por ejemplo, Wei Ying Yi et al. (2015), hace mención a 7 investigaciones donde se emplean este tipo de redes, además de los trabajos desarrollados por Lewis, A. et al. (2016), Cuevas-Martinez, J. C. et al. (2010), Choi, S. et al. (2009), Rainham et al. (2016), Pummakarnchana et al. (2005), Mohd Fauzi et al. (2012) y Moreu, F et al. (2017).

Este tipo de redes tienen la ventaja de presentar un consumo bajo de energía, se conoce en todo momento la ubicación de los nodos, el peso de los elementos no es considerable por lo que los nodos pueden soportarlo al estar fijos y con ello se pueden montar varios sensores en un mismo nodo, la conectividad con la red está garantizada al poder tener una posición fija y es posible realizar tareas de calibración y mantenimiento periódicamente. Por otro lado, los inconvenientes que pueden presentar este tipo de redes son el cuidado de la ubicación del nodo ya que el nodo se puede exponer a daño por parte de agentes externos y por ende, si la ubicación es complicada en cuanto acceso, la calibración y mantenimiento también estaría involucrada.

Por ejemplo, una aplicación de este tipo se encuentra en lo reportado por Tzai-Hung Wen et al. (2013) en su trabajo “*Monitoring Street-Level Spatial-Temporal Variations of Carbon Monoxide in Urban Settings Using a Wireless Sensor Network (WSN) Framework*” donde la WSN está formada por nodos sensores que recolectaron información respecto a la calidad del aire en tiempo real a nivel de calle, con cada nodo sensor incluyendo un módulo de procesamiento de señal, un sensor de monóxido de carbono (CO), un módulo de comunicación inalámbrico; y una plataforma de monitoreo y control basada en mapas para la visualización y gestión de datos de sensores. Otro

ejemplo se muestra con el trabajo de O. Pummakarnchana *et al.* (2005), titulado “*Air pollution monitoring and GIS modeling: a new use of nanotechnology based solid state gas sensors*”, cuyo objetivo principal es adquirir de forma remota datos de sensores continuos en un entorno urbano y al aire libre construyendo un sistema de monitoreo simple usando sistemas de detección de gas portátiles de bajo costo para monitorear la contaminación del aire en un área extensa y poder reportar datos de calidad del aire en tiempo real a través de Internet inalámbrico empleando sistemas de información geográfica (GIS, por sus siglas en inglés). P. Oikonomou *et. al* (2016) informó sobre el desarrollo y la caracterización de un sistema de detección inalámbrico que se utilizará para supervisar el entorno laboral de una instalación industrial empleando quimio-condensadores y comunicación ZigBee y WiFi.

c) Red Comunitaria de Sensores (CSN, por sus siglas en inglés). - En este tipo de redes, también llamadas redes participativas por el enfoque que manejan, los nodos son “cargados” por usuarios en bolsas, mochilas u objetos que los contengan. Básicamente emplean los mismos sensores que las SSN. Estas redes permiten a los usuarios adquirir, analizar y compartir la información de la contaminación local a través de sus dispositivos móviles. En comparación con las anteriores, este tipo de redes ofrece mayor cobertura espacio-temporal ya que los dispositivos son móviles en cierto rango o área. Este tipo de redes generalmente emplean conexiones USB, bluetooth o WiFi para establecer conexión con los dispositivos inteligentes de los usuarios para aprovechar los módulos WiFi o GPS para comunicarse y transmitir la información, es decir, hablamos de tecnologías de acceso libre. Sin embargo, hay que considerar que esto también puede ser una desventaja, ya que, al estar al acceso libre, la ubicación de las personas deja de ser privada, adicionalmente, el movimiento y acceso a los dispositivos. Probablemente la precisión, calibración y mantenimiento de los sensores baje o se deteriore en mayor frecuencia que en las SSN.

Wei Ying Yi et. al (2015) presenta seis trabajos en los cuales se emplean este tipo de redes, así mismo Juan Ignacio Huircán *et al.* (2010) en su trabajo, hace una propuesta con el mismo tipo de estructura de WSN (CSN), en este caso, los elementos que son empleados como “transporte” para la medición son ganado, los cuales tienen incorporados los sensores en aretes y transmiten la información recolectada a los postes que se encuentran dentro del área de pastaje. Alejandro Velasco *et al.* (2016) presenta una red de monitoreo móvil tipo CSN empleando bicicletas comunitarias en las cuales monta los nodos sensores, cuyo objetivo es complementar los sistemas ya existentes sistemas oficiales de monitoreo de la calidad del aire de la ciudad metropolitana de Torino.

d) Red Móvil de Sensores (VSN, por sus siglas en inglés).- Estas redes están caracterizadas por presentar sensores móviles de amplia cobertura espacio-temporal ya que los nodos son “cargados” por medios de transporte público como camiones, taxis o bicicletas y así se puede cubrir una amplia cobertura geográfica. Wei Ying Yi et. al (2015) en su trabajo “A Survey of Wireless Sensor Network Based Air Pollution Monitoring Systems” hace un recuento de ocho trabajos relacionados con este tipo de redes, así mismo Velasco *et al.* (2016), Yajie, M., *et al.* (2008), Dziadak, B., *et al.* (2016) y Al-Sakran, H.O., (2015) presentan trabajos con esta misma arquitectura. Una de las características importantes que ofrece este tipo de redes se encuentra en la alimentación eléctrica de los nodos, ya que tienen acceso a alimentación del medio de transporte y por ende, el peso y la cantidad de sensores en los nodos no son una limitante. La movilidad de los dispositivos es mucho mayor, así como las facilidades de mantenimiento y calibración. En contraparte, la movilidad es semicontrolada debido a que no hay acceso al control de la ruta o velocidad, además, pueden presentarse problemas de mediciones redundantes. Un inconveniente

que se puede presentar es el problema de sacrificar la cobertura temporal para darle mayor prioridad a la cobertura espacial.

Las configuraciones móviles del tipo VSN se explotan comúnmente para monitorear áreas de amplia cobertura, generalmente del tipo metropolitanas. Los nodos se pueden poner a bordo de vehículos, como automóviles privados o sistemas de transporte público, o bien, mediante el uso de vehículos aéreos no tripulados (UAV), incluso, pueden ser un dispositivo de detección personal (Velasco *et al.*, 2016).

Yajie Ma *et al.* (2008) reportan una red diseñada como arquitectura de red de dos capas: la subred móvil formada por los nodos de sensores móviles (MSN) montada en vehículos para mediciones de CO y NOx y la subred estática (SSN) distribuida en forma de malla donde el nodo SSN más cercano recibe la información recolectada por el nodo MSN. Hasan Omar Al-Sakran (2015) presenta un sistema de tráfico inteligente basado en la integración del Internet de las cosas (IoT), cuyo objetivo es presentar un marco para la adquisición de información de tráfico en tiempo real y la arquitectura de monitoreo empleando comunicaciones inalámbricas.

La clasificación anterior, presentada por Wei Ying Yi *et. al* (2015), se considera como una de las formas más precisas sobre la clasificación de las WSN orientadas particularmente a la medición ambiental.

3.3. Componentes de una WSN

Las WSN generalmente están compuestas de algunos receptores que a su vez se comunican con varios nodos de sensores que pueden operar en una amplia gama de entornos y proporcionan ventajas en costo, tamaño, potencia, flexibilidad e inteligencia distribuida en comparación con las soluciones convencionales de detección por cable. Estos nodos pueden cambiar de lugar y

configuración, pueden agregarse o eliminarse mientras que el funcionamiento continuo de la red sigue siendo alcanzable (Oikonomou, P. *et al.*, 2016).

Básicamente, una red de sensores se compone de nodos de sensores, que están desplegados densamente dentro, o muy cerca, del fenómeno a monitorear o analizar. Los componentes clave de una WSN inteligente suelen ser varios nodos, también llamados *motas*, que constan de tres unidades: detección, procesamiento y comunicación (Akyildiz, I.F. *et al.*, 2002). El concepto de microsensing y conexión inalámbrica de estos nodos promete muchas áreas de aplicación nuevas.

Debido a la gran diversidad de dispositivos en el mercado, es posible crear infinidad de combinaciones posibles para la implementación de nodos sensores. En los primeros trabajos realizados era muy común ver nodos sensores que fueran integración de diversas tecnologías en donde las características de desempeño llegaban a ser excluyentes, es decir, había nodos que se caracterizaban por tener un bajo consumo energético, pero limitado en cuanto a capacidad de almacenamiento, o velocidad de procesamiento, por otro lado, dispositivos con un procesamiento importante de datos múltiples pero con un alto consumo energético. Con el creciente avance tecnológico, los nuevos dispositivos superan por mucho las expectativas de décadas pasadas. Hoy podemos encontrar procesadores de alto desempeño con bajo consumo energético, memorias con velocidades de acceso y capacidades importantes a un bajo costo, módulos de alimentación eléctrica con eficiencias o modos de ahorro de energía que pueden mantener un dispositivo funcionando hasta por meses.

Unidad de detección: Sensores

Los sensores son dispositivos analíticos en los que se aplica un material sensible a un transductor físico adecuado para convertir un cambio en una propiedad de un material sensor, en una forma

legible de energía (Janata, 2009). Los sensores más comúnmente empleados para la medición de contaminación ambiental los podemos agrupar en: electroquímicos, catalíticos, de estado sólido, ópticos infrarrojos no dispersivos (NDIR) y ópticos por foto-ionización.

a) Sensores electroquímicos

Actualmente, una gran variedad de sensores electroquímicos están siendo usados en muchas aplicaciones estacionarias y portátiles. Aunque aparentemente parecieran ser similares los sensores electroquímicos entre sí, sus funciones son marcadamente diferentes, encontrando así, sensores electroquímicos con diferente sensibilidad, exactitud, selectividad, tiempo de respuesta, etc. De ahí que se puedan encontrar relaciones entre estas propiedades, tal es el caso de la sensibilidad que es inversamente proporcional al tiempo de vida del sensor y a la selectividad. Esto es, a mayor sensibilidad, menor selectividad y menor tiempo de vida del sensor. Las ventajas de este tipo de sensores son: (Chou, J., 1999)

- Los cambios de presión no tienen efectos sobre la medición del sensor
- Son generalmente muy selectivos con el tipo de gas para el cual fueron diseñados
- El tiempo de vida esperado es de uno a tres años, según el tipo de gas a medir
- Este tipo de sensores tienen el consumo energético más bajo.

b) Sensores catalíticos

Los sensores catalíticos inicialmente fueron empleados para detectar gases combustibles, como en minas de carbono o en la industria automotriz. Con el paso del tiempo, y la aparición de nuevas tecnologías, se fueron actualizando y han sido incorporados como medidores de hidrocarburos o alcoholes, debido a su fácil diseño y construcción. El desempeño y fiabilidad de ese tipo de sensores varía ampliamente según el fabricante. Puesto que la señal de salida del sensor es lineal,

la concentración de la lectura del gas es directamente proporcional a la señal eléctrica. Como auxiliar en la estabilidad y lectura de la medición del sensor, el puente de Wheatstone es ampliamente empleado en este tipo de sensores.

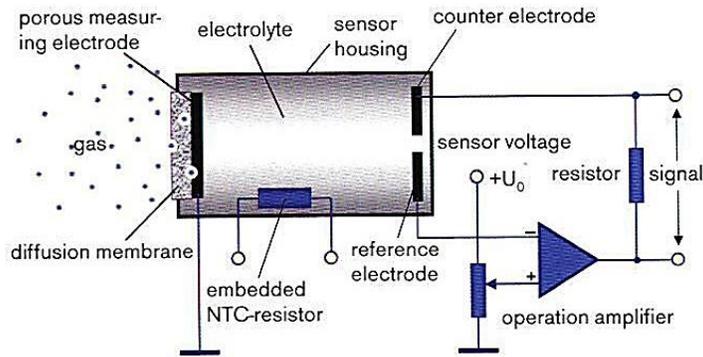


Figura 3. 3. Esquema interno de un sensor electroquímico de CO₂.

Estos sensores son más sensibles a ciertas sustancias, como el silicón, por lo que podrían “envenenar” al sensor o destruirlo. Otro punto importante a considerar es la concentración del gas o la temperatura, ya que también son sensibles al exceso de estos elementos. Por otro lado, estos sensores presentan de manera general, una precisión del $\pm 5\%$, una repetibilidad del 2%, un tiempo de respuesta de 10 a 15 segundos y su expectativa de vida es superior a 3 años según la aplicación.

c) Sensores de estado sólido

Actualmente, hay disponibles sensores de estado sólido para detectar más de 150 gases diferentes, la mayoría de ellos detectables con instrumentos analíticos costosos. Al igual que los electroquímicos, cada sensor presenta características diferentes, así como diferentes niveles de desempeño y calidad, por lo que son considerados como los sensores de mayor versatilidad. Su expectativa de vida es muy superior a los otros tipos de sensores. Entre las características

únicas de estos sensores se puede mencionar que tienen la habilidad de detectar tanto niveles bajos de gases en ppm, así como altos niveles.

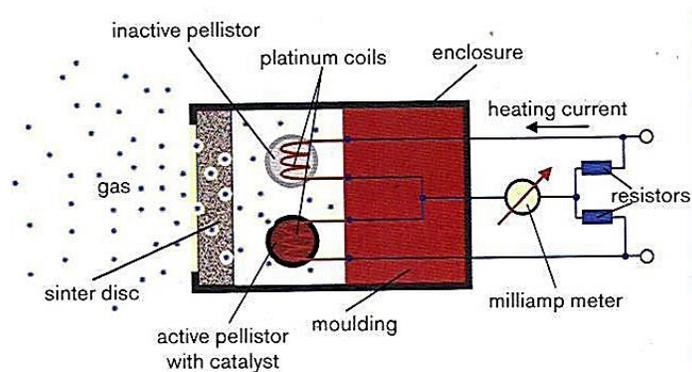


Figura 3. 4. Esquema interno de un sensor catalítico.

Las características de estos sensores son:

- Tiempo de vida superior a 10 años o más en aplicaciones limpias
- Más susceptibles a presentar interferencia por otros gases presentando falsas alarmas
- Presentan una alta versatilidad, pudiendo realizar mediciones de diversos tipos de gases y diversos rangos de medición
- Precisión aproximada del $\pm 3\%$ del 10% a escala completa
- Tiempo de respuesta que va desde 20 a 90 segundos
- Consumo energético aproximado de 300 mW

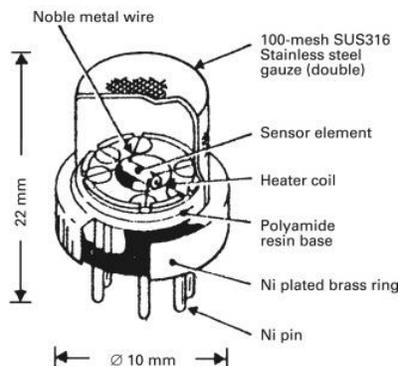


Figura 3. 5. Diseño de un sensor de estado sólido.

d) Sensores infrarrojos

Los analizadores de gases infrarrojos tienen fama de ser caros, complejos y complicados. Los gases empleados en este tipo de instrumentos generalmente son corrosivos o reactivos. La ventaja de este tipo de sensores es que no están en “contacto directo” con la sustancia a medir, por lo que las moléculas del gas interactúan únicamente con un haz de luz. En la actualidad muchos instrumentos infrarrojos están disponibles para una amplia variedad de aplicaciones. Otra de las ventajas que presentan estos sensores es su mínimo o nulo mantenimiento.

La región infrarroja es más útil para el análisis de gas porque la absorción de moléculas del gas es única y selectiva en esta región por lo que la “huella” es particular para cada tipo de gas. Una librería de estas curvas puede ser almacenada en la memoria interna de un instrumento para ser comparada posteriormente para identificar moléculas de gas. Una de las desventajas que presenta es que tienen un tiempo de respuesta relativamente lento, pero tienen una alta estabilidad de corriente directa. Los sensores ópticos infrarrojos no dispersos (NDIR) emplean filtros discretos ópticos pasa-banda. Las características más importantes que tienen son:

- Un sensor infrarrojo es esencialmente un sensor de temperatura por lo que es altamente sensible a los cambios de temperatura ambientales, por lo anterior, requieren de 10 a 20 minutos para estabilizarse
- Son afectados por la humedad por lo que pueden presentar corrosión o contaminación
- La energía infrarroja absorbida es directamente proporcional a la estructura molecular del hidrocarburo por lo que es necesario acoplar dispositivos que linealicen la salida
- Debido a su bajo mantenimiento, su expectativa de vida es larga, generalmente de 3 a 5 años.

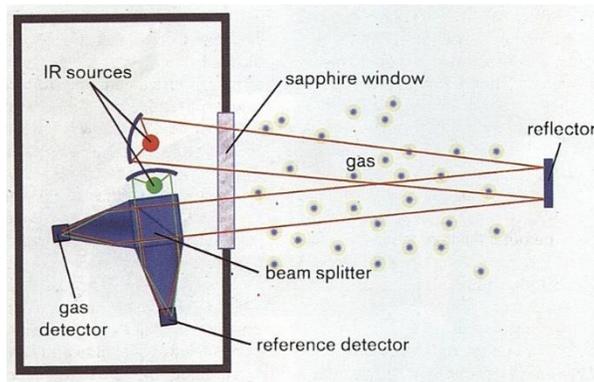


Figura 3. 6. Esquema interno de un sensor infrarrojo.

e) Sensores de foto-ionización

Los sensores de foto-ionización, en comparación con los infrarrojos, emplean luz ultravioleta para ionizar las partículas de gas, por lo que son más comúnmente empleados para detectar compuestos orgánicos volátiles (VOCs por sus siglas en inglés) o también llamados materiales particulados (PM por sus siglas en inglés). Estos instrumentos ofrecen muy alta respuesta, alta precisión y buena sensibilidad para detección de bajas concentraciones de VOC en ppm. Debido a que su funcionamiento depende de una lámpara, su expectativa de vida está en función de esta lámpara y generalmente está limitada a unas 6,000 horas aproximadamente,

por lo cual, requieren de un mantenimiento especial para limpiar la lámpara. Sus características son:

- Tiempo de respuesta aproximado de 3 segundos
- Rango de medición entre 100, 1000 y 2000 ppm
- Sensibilidad de 0.1 ppm
- Precisión entre 1% y 10% dependiendo del rango

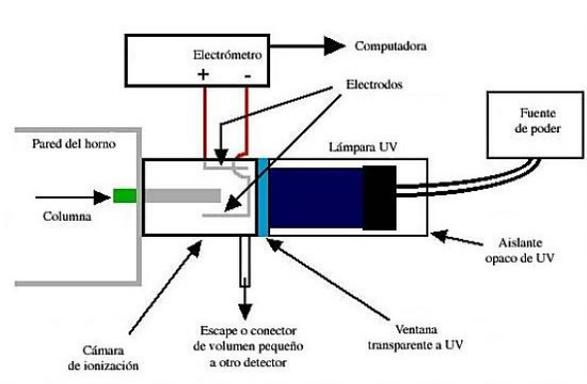


Figura 3. 7. Esquema interno de un sensor de foto-ionización.

Los sensores portátiles se están convirtiendo en un pilar de la investigación en el área de salud al mostrar la exposición de las personas a factores ambientales que van desde el ruido hasta materia particulada (PM). Los datos de contaminación adquiridos en tiempo real pueden integrarse en los sistemas de gestión del tráfico para darle seguimiento a los impactos de las políticas ambientales establecidas, así como la ubicación de zonas de alta y baja emisión de contaminantes en un área conurbada. Sin embargo, para aplicaciones reglamentarias, los gobiernos y los científicos aún utilizan los detectores más precisos pero caros. La Agencia de Protección Ambiental de EE. UU. ha creado un marco técnico para probar sensores de uso público, comparándolos con los monitores más precisos (Lewis *et al.*, 2016).

Uno de los objetivos principales para los ingenieros en el área de sensores es fabricar dispositivos de medición precisos de bajo costo, debido a que el costo de un sensor aumenta con su precisión o bien, la reducción del costo inevitablemente reduce la especificidad o la sensibilidad, o ambos (Hajiyev, 2016). La precisión es uno de los puntos delicados que deben de ser cuidados para la obtención de valores, así como que no es factible desmontar y volver a calibrar los sensores individualmente. Este problema es conocido como “calibración ciega” y Yuzhi Wang *et al.* (2017) considerando esto como una necesidad, hacen una propuesta de solución.

Es por ello que muchas investigaciones se centran en los procesos de calibración, por ejemplo, hacer un trabajo completo requiere la calibración del compuesto objetivo y todas las otras posibles interferencias que puedan estar presentes. Así, podemos encontrar trabajos como Detlef Lazik y Pramit Sood (2016) en el que proponen una alternativa a dependencia de sensores con múltiples pendientes de medición, ya que provoca muchas veces mediciones de lecturas erróneas por interferencias de otros gases. Para normalizar la respuesta del sensor, desarrollan un enfoque diferente para las mediciones de un solo componente gaseoso basado en un gas interno estándar. Otro ejemplo de sugerencia de calibración es propuesto por Tzai-Hung We *et al.* (2013) en donde para calibrar las lecturas de concentración de CO de los sensores inalámbricos, los calibran empleando una estación de EPA para establecer la función de calibración, antes de desplegarlos. Por otro lado, Caroline Schultealbert *et al.* (2017) presentan un método para mediciones cuantitativas de sensores de gas semiconductor de óxido metálico (MOS) que se basa en la relajación de los estados superficiales mediante el uso de ciclos de temperatura (TCO).

Los sensores económicos presentan algunos problemas en este campo por lo que las calibraciones de este tipo de sensores realizadas en el laboratorio y en el campo pueden diferir notablemente, y la mayoría de las relaciones observadas sólo se aplican a la ubicación particular y por un tiempo

limitado. Otro punto a considerar es que muchos de los procesos utilizados para sensores económicos, como las interacciones químicas entre gases y superficies, no se conocen bien. Sin embargo, en particular, los sensores de gas de estado sólido ofrecen una excelente oportunidad para la implementación en el monitoreo ambiental debido a su peso liviano, tamaño extremadamente pequeño, robustez, bajo costo y versátil instalación para recopilar datos que cubren áreas extensas (Pummakarnchanaa, O., *et al.* 2005).

La introducción de estos dispositivos en el dominio público, que genera grandes volúmenes de datos no probados y cuestionables disponibles para todos, es inevitable y se convertirá cada vez más en un problema para aquellos que son responsables de la gestión de la calidad del aire. Las empresas de nueva creación se están apresurando para producir sensores económicos de monitoreo del aire que presenten precisión y exactitud aceptable (Lewis *et al.*, 2016).

Los sensores “sencillos”, como los electrolíticos o de estado sólido, funcionan mejor cuando los niveles de contaminación son altos y/o cuando el compuesto de interés afecta a otros gases presentes; por ejemplo, los sensores para NO y NO₂ parecen funcionar bien en lugares con mucho tráfico y altos niveles de contaminación, donde las concentraciones de estos gases se acercan al nivel de partes por millón.

El auge de las energías renovables, en particular la solar, ha abierto el panorama a nuevas soluciones, configuraciones y calibraciones que permitan un alto rendimiento de la WSN. Por ejemplo, Robert Bogue (2012) en su trabajo “Solar-powered sensors: a review of products and applications”, presenta una revisión referente la tecnología y las aplicaciones de los sensores con energía solar. Bogdan Dziadak *et al.* (2016) presentan una revisión sobre sistemas de “cosecha” energética para WSNs enfocadas al monitoreo ambiental, en las cuales se minimiza el uso de baterías de litio o cadmio a través de acoplar dispositivos que aprovechen las energías renovables

para alimentar los nodos. Alexander Baranova *et al.* (2015) en su investigación “Optimization of power consumption for gas sensor nodes: A survey”, a partir de la premisa de que un sensor de gas es el componente consumidor energético más alto en un nodo con respecto a aplicaciones típicas en las que los módulos de comunicación tienen este rol, explora diversas alternativas para la optimización del consumo energético para nodos que emplean este tipo de sensores de gas. En este sentido, Andrey Somov *et al.* (2015) en su trabajo “Compact Low Power Wireless Gas Sensor Node With Thermo Compensation for Ubiquitous Deployment” desarrollan técnicas que permiten la aplicación de sensores catalíticos para el monitoreo de fugas de gas en condiciones ambientales a través de la propuesta del circuito de Wheatstone modificado y un mecanismo de control de difusión de gas.

La mayoría de los trabajos analizados presentan las siguientes recomendaciones en cuanto a la medición de gases relacionados con la contaminación ambiental:

- En referencia a la medición de CO, se recomienda emplear sensores de estado sólido o electroquímicos.
- En referencia a la medición de NO₂, es recomendable el uso de sensores electroquímicos o de estado sólido, sin embargo, hay que considerar la interferencia que pudiera presentarse con O₃. Es necesario emplear procedimientos para eliminar falsas lecturas o interferencias. No son recomendables los sensores catalíticos debido a la interferencia que presentan con el CO₂ y H₂, esto reportado por Alastrair Lewis *et al.* (2016).
- En referencia a la medición de O₃, puede ser detectado adecuadamente por sensores electroquímicos o de estado sólido. Hay que considerar la interferencia recíproca de NO₂.

- El SO₂ únicamente puede ser detectado por sensores de estado sólido o electrolíticos, los sensores catalíticos son “envenenados” por este gas y los NDIR no tienen la escala suficientemente alta.
- Respecto al CH₄, la normatividad existente considera los límites máximos permisibles, en concentraciones en espacios cerrados entre 0.5% Vol y 1% Vol. Teniendo nivel de riesgo 4 por inflamabilidad y toxicidad y nivel 2 por efectos sobre la salud, según la Asociación Nacional de Protección contra el Fuego (NFPA por sus siglas en inglés). Por otro lado, no está definido un nivel máximo permisible de concentración como contaminante ambiental en espacios abiertos.

Unidad de procesamiento: Microcontroladores

En la actualidad, y gracias al avance tecnológico, podemos encontrar dispositivos más sofisticados e incluso integrados en un mismo módulo para ser empleados de manera eficiente en los nodos sensores, caracterizados por un alto procesamiento, almacenamiento modesto y dispositivos de comunicación de bajo consumo energético para interactuar con otros dispositivos. Las unidades de procesamiento (CPUs) y memoria para el diseño de los nodos sensores eran, hasta hace algunos años, todavía recursos limitados. Por lo que un nodo sensor debía tener capacidades computacionales integradas como un banco de memoria, un módulo de alimentación independiente y un módulo externo de comunicación para ser capaz de interactuar con su entorno (I.F. Akyildiz *et al.*, 2002). Por ejemplo, Bogdan Dziadak, *et al.* (2016) presenta en su reporte de trabajos, una propuesta de una red simple que monitorea solo la temperatura del aire, en donde el nodo sensor se basa en un circuito MSP430 y un transceiver nRF24L01 cuya propuesta está orientada al bajo consumo de energía.

Las señales analógicas producidas por los sensores son convertidas a señales digitales por el ADC dentro de los microcontroladores, y posteriormente enviadas a la unidad de procesamiento. La unidad de procesamiento, la cual es generalmente asociada con una unidad de almacenamiento pequeña, maneja los procedimientos haciendo que el nodo sensor colabore con los otros nodos para llevar las tareas de sensado asignadas.

Podemos considerar la unidad de procesamiento como el administrador central del nodo sensor ya que por un lado recibe los datos del sensor que son convertidos por el ADC. Posteriormente, puede o no aplicar métodos o procedimientos a la información recibida, y finalmente se encarga de enviar dicha información por el canal de comunicación instalado. Sin embargo, es importante resaltar que esta unidad puede desempeñar otros roles dentro del mismo nodo, tales como administrar el consumo energético, gestionar el ahorro de energía de cada uno de los elementos que forman el nodo, comprobar información recibida o enviada de y hacia otros nodos, etc. Y en esas actividades es en donde se han centrado muchos de los trabajos desarrollados en WSN buscando nodos más eficientes.

Por otro lado, se han reportado múltiples trabajos en donde el montaje de varios sensores de gas en un mismo nodo sensor tiene ventajas en términos de uso de energía, costo, tiempo de instalación y detección de contaminantes, en comparación con diseños de placa de sensores múltiples y separados, tal como lo presenta Sukwon Choi *et al.* (2009) en su trabajo “Micro Sensor Node for Air Pollutant Monitoring: Hardware”, presentando un nodo sensor con 6 sensores para monitorear CO, NO₂, VOC, PM, CO₂; Yajie Ma *et al.* (2008) en su trabajo titulado “Air Pollution Monitoring and Mining Based on Sensor Grid in London” proponen un nodo sensor que monitorea NO_x, SO₂ y O₃; Por otro lado, Wei Ying Yi *et al.* (2015) con su review “A Survey of Wireless Sensor

Network Based Air Pollution Monitoring Systems” presenta un concentrado de diversos trabajos de WSN con múltiples sensores en un mismo nodo sensor.

Hay trabajos reportados en donde la propuesta hace referencia al ahorro de energía basado en la programación del nodo. Velasco A. *et al.* (2016) mencionan que los ahorros de energía pueden ser alcanzados implementando algoritmos para reducir el monto de los datos a transferir. Adicionalmente, hacen hincapié en un post-procesamiento de la información una vez que haya salido del nodo sensor, es decir, cuando los datos son transmitidos en estaciones de acoplamiento, y almacenados en el servidor, estos pueden ser post-procesados considerando los valores medios por hora como medida para contrarrestar cualquier posible error producido por algún dato perdido por los sensores. Este trabajo emplea una plataforma integrada llamada Waspote, caracterizada por asegurar un bajo costo, portabilidad y características confiables necesarias para un sistema móvil. Siguiendo con el ahorro de energía, Alexander Baranov *et al.* (2015) presentan un trabajo interesante al hacer un análisis del consumo energético de los sensores de gas proponiendo técnicas para la optimización en el consumo de energía, ya que consideran que en los nodos sensores que tienen sensores de gas tipo catalíticos o infrarrojos presentan mayor consumo energético debido a que estos son los componentes más “hambrientos” en los módulos con respecto a otras aplicaciones en donde el mayor consumo está en los chip de radio comunicación.

Otra área de estudio es la incorporación de técnicas o métodos de procesamiento tales como inteligencia artificial, minería de datos o lógica difusa por mencionar algunas, cuyo objetivo es un mejor desempeño, ahorro de energía, mejorar el tratamiento o la gestión de datos del nodo sensor. Por ejemplo, Cuevas-Martinez J.C. *et al.* (2010) presentan un ejemplo de un sistema basado en lógica difusa y una aplicación de monitoreo de la contaminación acústica que obtiene un indicador de ruido difuso. Mencionan que una de las principales características de estos sistemas es la

capacidad de incorporar el conocimiento humano al dar cuenta de su falta de precisión e incertidumbre o imprecisión. Un área que recientemente está teniendo mucho auge; dentro de las técnicas computacionales, son las llamadas “grids” o enmallados computacionales. Por ejemplo, Yajie Ma *et al.* (2008) presentan una infraestructura distribuida basada en una WSN y tecnología computacional de malla para el monitoreo de contaminación del aire y minería de datos, que tienen como objetivo desarrollar redes de sensores ubicuas de bajo costo para recopilar datos ambientales a gran escala, en tiempo real y comprensivos de las emisiones de rutas de tráfico para el monitoreo de contaminación del aire en entorno urbano.

Los sistemas en tiempo real no son la excepción, diversos trabajos han apostado por desarrollar WSNs que trabajen en tiempo real para tener una mejor precisión y proyección en las mediciones de gases, tales como Wen T-H *et al.* (2013), quienes establecieron un *framework* base para un sistema en tiempo real de monitoreo basado en WSN para entender los cambios espacio-temporales a nivel de calle para el monóxido de carbono (CO) en condiciones urbanas. La mayoría de las investigaciones de Yajie Ma *et al.* (2008) abordan los problemas de consulta de datos en tiempo real, acceso a datos distribuidos y gestión de heterogeneidad. Por otro lado, hay múltiples autores que cuestionan la aplicación en tiempo real, ya que consideran que no es tan crítico adquirir datos de manera tan inmediata. Para ellos, el comportamiento de los gases lo consideran como un proceso pasivo bajo ciertas condiciones estables en el ambiente. Adicionalmente, otros autores consideran que el muestrear en tiempo real podría crear errores en la adquisición de datos, así como un exceso de consumo energético debido a la transmisión constante de la información.

Uno de los problemas que más se presenta en los nodos es el proceso de transmisión de la información, desde que el sensor adquiere la señal, transformada por el ADC, acondicionada y procesada por el microcontrolador y finalmente enviada al módulo de comunicación para ser

transmitida a la red y posteriormente, llegar al servidor para ser almacenada o publicada. El problema radica en que no son considerados los tiempos que intervienen en cada uno de los procesos, por ejemplo, en la etapa inicial donde participan el sensor y el microcontrolador, es importante tomar en cuenta que la frecuencia operativa del sistema debe considerar las características individuales de los sensores, en particular, deben de considerarse las características del sensor que responda más lentamente para garantizar la integridad de la información proporcionada. Sukwon Choi et.al. (2009) en su trabajo “Micro Sensor Node for Air Pollutant Monitoring: Hardware” analizan esta situación.

Unidad de comunicación: Arquitectura de redes inalámbricas

Las principales tecnologías inalámbricas utilizadas para construir redes de sensores inalámbricas son red de área personal inalámbrica (Bluetooth / ZigBee), red de área local inalámbrica (Wi-Fi), red de área metropolitana inalámbrica (WiMAX), red de área amplia inalámbrica (redes móviles 3G / 4G) y satélite red (GPS) (Hasan Omar Al-Sakran, 2015). Velasco A. *et al.* (2016) mencionan que la adquisición de datos básica, conectando el sistema a plataformas existentes a través de software libre es considerada como una probable ventaja potencial de los nodos. De los trabajos analizados en esta investigación, se identifica a ZigBee; estándar IEEE 802.15.4, como la tecnología más empleada en WSNs porque ofrecen ventajas como bajo consumo energético al trabajar con baja transferencia de datos y bajo ciclo de trabajo, configuración P2P² o P2M³, frecuencia de trabajo 2.4 GHz, rango de distancia hasta 75 metros.

² P2M. – *Peer to Many*. Tipo de conexión destinada a la comunicación entre aplicaciones. Permite compartir información y archivos de uno a múltiples dispositivos.

³ P2P. – *Peer to Peer*. Tipo de conexión destinada a la comunicación entre aplicaciones. Permite compartir información y archivos de uno a otro sin necesidad de intermediarios.

Como ejemplo de una aplicación desarrollada basada en propuestas de arquitecturas de redes, como ZigBee, está el trabajo de Juan Ignacio Huircán *et al.* (2010) donde presentan el diseño de un esquema de localización en WSN para aplicaciones de monitoreo de ganado en campos de pastoreo, sin requerir hardware adicional para la estimación de distancias ya que se realizaron utilizando la indicación de calidad del enlace (LQI), que es una característica estándar del protocolo ZigBee. O Velasco A. *et al.* (2016) en cuyo trabajo indica que los datos recopilados por las bicicletas podrían combinarse con la geo-referencia proporcionada por el GPS, de modo que los contaminantes puedan asociarse con una calle en particular. Robert Bogue (2012), presenta aplicaciones empleando arquitecturas diversas. Por ejemplo, se menciona que TDC Traffic Systems Ltd produce un sistema de monitoreo de calidad del aire (AQ) "Hi-Trac E-MOTE" que puede incluir hasta 100 nodos en un área de 1 km² que se comunican empleando ZigBee, otro ejemplo es Microstrain, Inc. que ha instalado un sistema de monitoreo que analiza vibraciones, tensión y temperatura del puente Goldstar en Londres empleando un transceiver inalámbrico integrado ZigBee (CC2420 de Texas Instruments) que transmite en la banda ISM de 2.4 GHz. O. Pummakarnchanaa *et al.* (2005) desarrollan una aplicación portátil, realizando una combinación de mediciones de tierra a través de sensores de bajo costo y GIS inalámbrico. Dicho dispositivo portátil, que comprende sensores de gas de estado sólido integrados a un asistente digital personal (PDA) vinculado a través de herramientas de comunicación Bluetooth y sistema de posicionamiento global (GPS), permitirá la diseminación rápida de información sobre niveles de contaminación en múltiples sitios simultáneamente.

Acerca de los estudios de redes inalámbricas, Hasan Omar Al-Sakran (2015) menciona que hay muchos factores que se consideran en la implementación de una WSN desde el punto de vista de topologías y protocolos: bajo costo, administración de energía eficiente, alcance, fidelidad de los

datos, seguridad, para nombrar unos pocos. Adicionalmente, se requieren técnicas de redes inalámbricas *ad hoc*. Aunque se han propuesto muchos protocolos y algoritmos para las redes *ad hoc* inalámbricas tradicionales, no son adecuados para las características únicas y los requisitos de aplicación de las redes de sensores, lo que ha generado un área de oportunidad y de trabajos enfocados a la solución de esta problemática a través del desarrollo de técnicas, protocolos, arquitecturas, etc. Por ejemplo, I.F. Akyildiz *et al.* (2002) en su trabajo “Wireless sensor networks: a survey” presentan un resumen de protocolos y algoritmos propuestos para las redes de sensores. Muchos de los protocolos de enrutamiento de red de sensores propuestos también requieren los sistemas de posicionamiento global (GPS). Así, en uno de los trabajos mencionados se hace referencia a la pila de protocolos que combina la potencia y el conocimiento de enrutamiento, integra datos con protocolos de red, comunica potencia eficientemente a través del medio inalámbrico y promueve esfuerzos cooperativos de nodos sensores.

Recientemente, los investigadores cambiaron su atención a revolucionar el paradigma del Internet de las Cosas (IoT por sus siglas en inglés), lo que resultó en la construcción de un entorno más conveniente compuesto de varios sistemas inteligentes en diferentes dominios, como inventarios comerciales de inteligencia, cuidado de la salud, hogar inteligente, entorno inteligente, medición inteligente, suministro, logística de cadenas, venta minorista, agricultura inteligente, monitoreo de equipos eléctricos, etc. Esto debido a que IoT se puede utilizar para crear un mundo en el que todos los objetos inteligentes de nuestra vida cotidiana estén conectados a Internet e interactúen entre sí con la mínima participación humana para alcanzar un objetivo común. Por otro lado, el principal problema es la interoperabilidad entre diferentes estándares, formatos de datos, hardware heterogéneo, protocolos, tipos de recursos, software y sistemas de bases de datos. Otro problema

es la necesidad de una interfaz inteligente y acceso a diversos servicios y aplicaciones. Parece que los agentes móviles son una herramienta conveniente para manejar estos problemas.

I.F. Akyildiz *et al.* (2002) mencionan en su trabajo que el IoT orientado al monitoreo ambiental ofrece una nueva tendencia para el desarrollo inteligente del tráfico. La moderna gestión del tráfico está evolucionando hacia un sistema de transporte inteligente basado en IoT. Sin embargo, para redes de sensores, se requiere un transceptor de potencia ultra-baja de bajo costo y tamaño pequeño. Las comunicaciones de RF requieren modulación, paso de banda, filtrado, demodulación y circuitos de multiplexación, lo que los hace más complejos y caros. Además, la pérdida de trayecto de la señal transmitida entre dos nodos de sensor puede ser tan alta como el exponente de cuarto orden de la distancia entre ellos, porque las antenas de los nodos de sensor están cerca del suelo. Finalmente, menciona que existen ciertas limitaciones de hardware y la compensación entre la eficiencia de la antena y el consumo de energía limitan la elección de una frecuencia portadora para tales transceptores al rango de frecuencia ultra alta. Debido a lo anterior, proponen el uso de la banda ISM de 433 MHz en Europa y la banda ISM de 915 MHz en América del Norte.

La banda Sub-1 GHz ha sido una herramienta que ha fortalecido las WSN y en la que el IoT ha encontrado como medio para desarrollar sus dispositivos. Este rango de frecuencias y sus protocolos ofrecen muchas ventajas con respecto a otros, haciendo de este medio la arquitectura para el desarrollo de nuevas tecnologías en las WSN. Algunas de las ventajas que ofrece este rango de frecuencias son: a) Las bandas que forman el espectro sub-1 GHz (433 MHz Latinoamérica, 915 MHz E.E.U.U., 868 MHz Europa, 920 MHz Japón) son de licencia libre y pueden ser administradas por el mismo hardware por lo que no es necesario adquirir un dispositivo para cada frecuencia. b) Mayor rango de cobertura debido a su baja frecuencia de transmisión, pudiendo tener hasta 1 km de alcance punto a punto, así como una mejor penetración en el medio, superior

a la que ofrece 2.4 GHz. c) Reducción del consumo de energía gracias al rango de frecuencias de trabajo por lo que se puede obtener el mismo rango que 2.4 GHz pero a un menor consumo. d) Mejor coexistencia con otros dispositivos de trabajo en el mismo medio, debido a que esta banda de frecuencias está menos saturada en comparación con la banda de 2.4 GHz, existiendo menos probabilidades de colisión en la transmisión de datos.

Cuevas-Martinez J.C. *et al.* (2010) propusieron el desarrollo de un nuevo sistema distribuido en una red real, en el cual cada nodo sensor puede ejecutar un conjunto de aplicaciones para proveer ruteo, enmallado y fragmentación a través del protocolo LowPAN, uno de los protocolos que se pueden emplear en esta frecuencia.

CAPÍTULO 4:
MODELOS DE DISPERSIÓN

4.1. Introducción

La mayoría de las actividades humanas y los procesos naturales llevan a alguna forma de contaminación del aire. Está estimado que la contaminación del aire causa decenas de miles de muertes prematuras en Estados Unidos. Para determinar la concentración del contaminante que afecta a la población, es necesario conocer el grado de dispersión del contaminante en el aire.

La dispersión es el esparcimiento de un compuesto en un fluido como resultado de movimientos aleatorios del fluido y sus moléculas, también es generalmente referida como difusión o algunas veces difusión turbulenta. El modelado de la dispersión del aire es una técnica poderosa para evaluar si una fuente de aire contaminante crea un problema o no. Un problema de contaminación del aire puede ser definido vagamente como una concentración ambiental, o combinación, de un contaminante que excede el nivel aceptable para una localidad determinada, basados en regulaciones, toxicología, etc.

Algunas razones del uso de modelos de dispersión son:

- a) No es posible medir la calidad del aire en un área relevante de forma permanente.
- b) Conocer el impacto de una fuente sobre la calidad del aire.
- c) Determinar la fuente contaminante cuando se encuentre un contaminante en el aire.
- d) Determinar la reducción de emisión requerida para solucionar el problema de contaminación.
- e) Plan de respuesta a emergencias, tales como fugas accidentales.

Un problema de contaminación ambiental nunca es el resultado de un evento aislado, pero es el resultado de una cadena de eventos: desde la formación de un contaminante en un proceso de

emisión, la dispersión y transformación química en la atmósfera, hasta la asimilación por el receptor o un efecto nocivo en la salud o enfermedad.

La contaminación ambiental es influenciada por:

- a) El clima. - Velocidad del viento, dirección del viento, temperatura, lluvia, sol.
- b) El terreno. - Edificios, colinas, superficie del agua.
- c) La fuente. - Altura y diámetro de la fuente, temperatura y velocidad del gas, concentración del contaminante.
- d) Propiedades físicas y químicas del contaminante, reactividad, solubilidad, etc.

4.2. Meteorología y atmósfera

La meteorología se define como la ciencia de la atmósfera, la atmósfera es el medio en el que se emiten los contaminantes. Los contaminantes son desplazados gracias al aire y al intercambio de calor que se produce en la atmósfera. Las etapas de transporte en la atmósfera son: transporte, dispersión, transformación y remoción.

La meteorología de la contaminación del aire es el estudio de cómo estos procesos atmosféricos afectan el destino de los contaminantes del aire. Este conocimiento es empleado para manejar y controlar la descarga de contaminantes en el aire en exteriores ayudando a asegurar que las concentraciones en el ambiente cumplan con los estándares de calidad del aire, adicionalmente, es esencial para entender el destino y transporte del contaminante.

Composición de la atmósfera

El aire seco está formado, de forma general, por aproximadamente 78% de nitrógeno, 21% de oxígeno y 1% de argón, también existen gases traza como el dióxido de carbono, el neón y el helio.

Existe poco vapor de agua, el cual absorbe seis veces más radiación que cualquier otro componente atmosférico por lo que es muy importante para la preservación de la vida en el planeta.

Tabla 4 - 1. Composición química del aire atmosférico seco.

Sustancia	Concentración (ppm) ¹
Nitrógeno	780.900
Oxígeno	209.400
Argón	9.300
Dióxido de carbono	315
Neón	18
Helio	5,2
Metano	2,3
Criptón	0,5
Hidrógeno	0,5
Xenón	0,08
Dióxido de nitrógeno	0,02
Ozono	0,01-0,04

Capas de la atmósfera

La atmósfera se divide en cuatro capas: troposfera, estratosfera, mesosfera y termósfera. La troposfera es la capa más baja y contiene casi el 75% de la masa atmosférica. Aquí se encuentran las masas de aire, frentes y tormentas que determinan el clima de la tierra. La troposfera (más allá) está a 16.5 Km sobre el Ecuador. Los cambios estacionarios determinan el grosor de la misma y casi toda la contaminación se emite en esta capa. Su transporte está determinado por la velocidad y dirección del viento. La tasa de dispersión depende de la estructura térmica y de la agitación mecánica del aire. La remoción de los contaminantes no sólo depende de sus características sino de los fenómenos climáticos.

- La importancia de la meteorología de la contaminación del aire

La meteorología se usa para predecir el impacto ambiental de una nueva fuente de contaminación del aire y para determinar el efecto de las modificaciones de las fuentes existentes en la calidad del

aire. Cuando se desarrollan condiciones meteorológicas que no conducen a la dispersión de los contaminantes, se debe asegurar que los contaminantes no se concentran en niveles inaceptables.

Balance térmico de la atmósfera

La radiación recibida regresa como radiación terrestre y da lugar a un balance térmico, llamado *balance de radiación*. De cada 100 unidades de energía que ingresan a la atmósfera, 51 son absorbidos por la tierra, 19 por la atmósfera y 30 reflejados al espacio las 70 unidades absorbidas son irradiadas nuevamente al espacio como una radiación de onda larga.

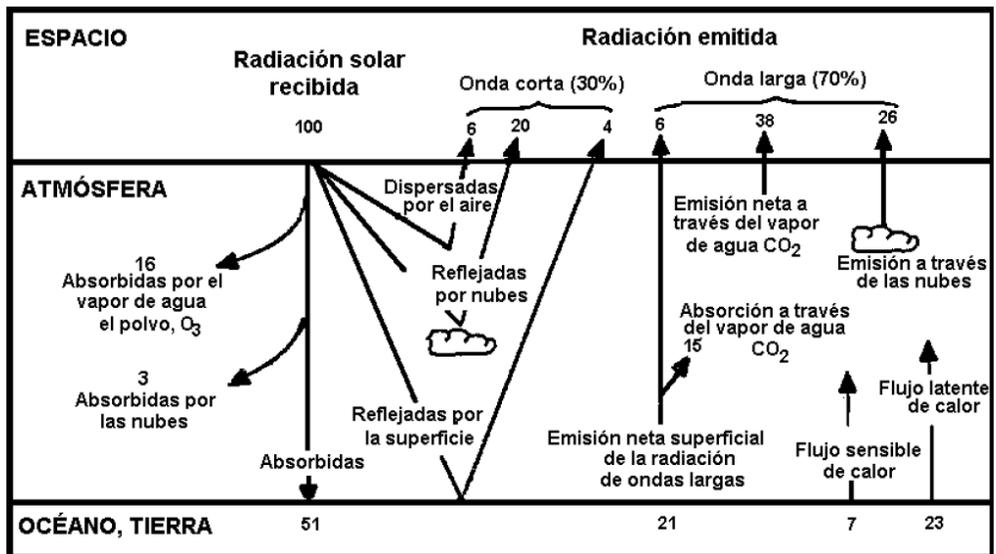


Figura 4. 1. Radiación y balance térmico.

a) Radiación e insolación

La energía consumida en casi todos los procesos atmosféricos proviene del sol a través de la radiación del calor en el rango visible (longitud de onda entre 0.38 y 0.39 μm). Las longitudes de onda mayores a 2.5 μm son absorbidas por el Nitrógeno y el Oxígeno. La tierra absorbe radiaciones entre 0.29 y 2.5 μm. La insolación es cuando se recibe en una hora y en un lugar

específico cierta cantidad de radiación solar, la cual es determinada por cuatro factores: a) constante solar, b) transparencia de la atmósfera, c) duración de la luz del día y d) ángulo de incidencia del sol a la tierra.

- Constante solar

Es la cantidad promedio de radiación recibida en un punto perpendicular a los rayos solares, entre el sol y la tierra.

Tabla 4 - 2. Valores para la constante solar.

Constante solar =	1,94 cal/cm ² min
	1.353 W/m ²
	428 Btu/pies ² h
	4,871 kJ/m ² h

- Transparencia de la atmósfera

La transparencia se refiere al monto en que la radiación penetra en la atmósfera y llega a la superficie terrestre sin agotarse. Una parte de la radiación se refleja, otra se absorbe y otra pasa. El *albedo* es la fracción o porcentaje de la energía solar incidente que refleja una superficie al espacio. Para la tierra y la atmósfera como un todo, tienen un 30% cuando hay nubosidad.

La cantidad de radiación recibida por la superficie es considerablemente menor que la recibida fuera de la atmósfera. La tierra se calienta cuando absorbe energía y se enfría cuando irradia. Así mismo, absorbe y emite al mismo tiempo. Si la superficie terrestre absorbe más energía, se calienta, si irradia más que la absorbida, se enfría. En la atmósfera, las nubes, el vapor de agua y, en menor grado, el dióxido de carbono, absorben la radiación terrestre, que hace que la atmósfera se caliente. La atmósfera absorbe mucha más radiación terrestre que

radiación solar. La absorción atmosférica de la radiación terrestre beneficia al sistema Tierra-atmósfera al captar la radiación que se podría perder en el espacio. Este fenómeno explica por qué la temperatura del aire generalmente es más caliente durante las noches nubladas que durante las despejadas. El *efecto invernadero* es el nombre dado al resultado del proceso de intercambio de energía que hace que la superficie terrestre se caliente más que lo que se calentaría si la atmósfera no volviera a irradiar energía a la Tierra.

Los gases de efecto invernadero (antropogénicos o naturales) tales como el CO₂ y el CH₄ también aumentan la capacidad de la atmósfera para absorber radiación. Cuando la calientan más rápido de lo normal se le conoce como *calentamiento global*.

Tabla 4 - 3. Gases de efecto invernadero.

Gas del efecto invernadero	% del total de los gases del efecto invernadero	Fuentes y % del total de los gases del efecto invernadero
Dióxido de carbono (CO ₂)	50	Energía de combustibles fósiles (35) Deforestación (10) Agricultura (3) Industria (2)
Metano (CH ₄)	16	Energía de combustibles fósiles (4) Deforestación (4) Agricultura (8)
Óxido nitroso (N ₂ O)	6	Energía de combustibles fósiles (4) Agricultura (2)
Clorofluorocarbonos (CFC)	20	Industria (20)
Ozono (O ₃)	8	Energía de combustibles fósiles (6) Industria (2)

Fuente: Williams, M. 1993.

- Duración de la luz del día

También afecta la cantidad de insolación recibida: mientras más tiempo el periodo de luz, más posible la insolación total solar.

- Ángulo de incidencia del sol a la tierra

El ángulo con que los rayos solares caen sobre la Tierra varía considerablemente debido al movimiento del sol. Las áreas donde los rayos solares son oblicuos reciben menos insolación, por lo que al mediodía se produce la mayor intensidad de insolación.

b) Distribución del calor

Debido a las extremas diferencias de temperatura entre el Ecuador y los polos, el sistema Tierra-Atmósfera se asemeja a un “motor térmico” gigante.

c) Calentamiento diferencial

La superficie térmica no solo recibe diferentes magnitudes de radiación solar, sino que las diversas superficies terrestres absorben energía térmica en magnitudes distintas. El calor, la forma, la textura de la superficie, la vegetación y la presencia de construcciones puede influir en el calentamiento y enfriamiento de la tierra. La propiedad que hace que las diferentes superficies se calienten y se enfríen en velocidades distintas se denomina *calentamiento diferencial*. La superficie terrestre se calienta rápidamente durante el día y se enfría igual por la noche, no así en las acuáticas, debido a que:

- El movimiento del agua produce calor
- Los rayos solares pueden penetrar la superficie acuática
- Se requiere más calor para cambiar la temperatura del agua debido a su calor específico
- La evaporación del agua es un proceso de enfriamiento

d) Transporte de calor

Además de la radiación, el calor se transmite por conducción, convección y advección, afectando la temperatura de la atmósfera cercana a la superficie terrestre.

- Conducción. - Se transmite el calor a través de la materia, sin que esta en sí se transfiera.
- Convección. - La transferencia de calor se produce cuando la materia está en movimiento.
- Advección. - Esta transferencia se produce principalmente por el movimiento del aire horizontal antes que por el vertical.

4.3. La estructura dinámica de la atmósfera

El aire se mueve a fin de equilibrar los desbalances de presión atmosférica que causan las variaciones de la insolación y el calentamiento diferencial, este último es la causa principal de la circulación atmosférica en la tierra.

Circulación atmosférica

Los vientos superficiales se comportan de manera diferente que los vientos de altura debido a las fuerzas de fricción que actúan cerca de la superficie terrestre. El movimiento del aire ayuda a evitar que las concentraciones de los contaminantes liberados al aire alcancen niveles peligrosos.

Presión atmosférica

La presión atmosférica es causada por las moléculas de aire que chocan tanto entre sí como con otros objetos y rebotan, y depende del peso del aire de la capa superior. Si se calienta, aumenta su presión, si se enfría disminuye. Los ciclos concéntricos alrededor de las áreas de mayor o menor presión se denominan isobaras (ver Figura 4. 2. Representación de isobaras.Figura 4. 2), que son líneas de igual presión.

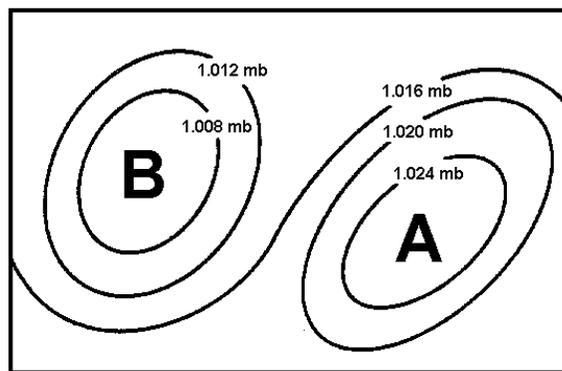


Figura 4. 2. Representación de isobaras.

Viento

Es el elemento básico en la circulación general de la atmósfera. Todos los movimientos del viento, contribuyen al transporte del calor y otras condiciones de la atmósfera alrededor de la tierra. La denominación de los vientos depende de la dirección de donde provienen, así un “viento norte” es un viento que se mueve de norte a sur. Cuando los vientos soplan con mayor frecuencia desde una dirección que desde otras, esta recibe el nombre de viento prevalente. La velocidad del viento aumenta rápidamente con la altura sobre el nivel del suelo mientras que la carga de fricción disminuye. Las ráfagas de viento que se producen cerca de la tierra se deben a las irregularidades de la superficie, lo cual crea remolinos, los cuales son variaciones de la corriente principal del flujo del viento. Las irregularidades mayores se producen por convección, es decir, por transporte de calor.

Fuerza de Coriolis

La fuerza de Coriolis causa una desviación del aire a la derecha en el hemisferio norte y viceversa en el hemisferio sur, aparentemente causada por la rotación de la tierra bajo la acción del movimiento del aire. Esta fuerza aparentemente en el viento:

- Aumenta a medida que se incrementa la velocidad del viento,

- Permanece en ángulos rectos en relación con la dirección del viento y
- Crece cuando la latitud aumenta.

La realidad es que esta fuerza se mueve con el viento.

Fuerza del gradiente de presión

El viento se produce por la tendencia de la naturaleza a corregir las diferencias en la presión atmosférica. La presión que equilibra la fuerza que tiende a mover el aire de la presión alta a la baja se denomina *fuerza del gradiente de presión (FGP)*, y es la tasa y dirección del cambio de presión. Las FGP se representan por una línea trazada en los ángulos derechos de las isobaras (ver Figura 4. 3). Cuando las isobaras están cerca, los gradientes son inclinados y el viento se moverá más rápidamente a través de las isobaras inclinadas. Los vientos son más suaves cuando las isobaras están más alejadas porque la pendiente entre estas no es tan inclinada.

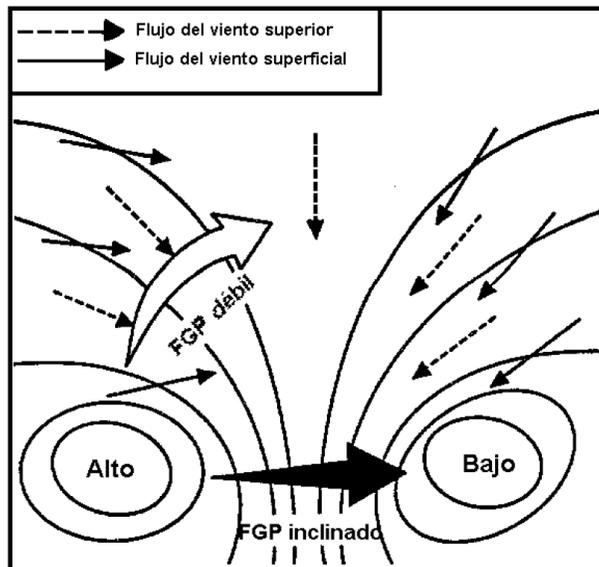


Figura 4. 3. Gradientes de presión.

Fricción

La tercera fuerza principal que afecta al viento, empieza a actuar cerca de la superficie terrestre hasta que llega a altitudes aproximadas de 500 a 1,000 metros. Esta sección se llama capa límite planetaria o atmosférica. La fuerza de Coriolis y la FGP se encuentran balanceadas por encima de la capa límite planetaria. El efecto de la fricción sobre el viento aumenta a medida que este se acerca a la superficie terrestre. Mientras más accidentada la superficie, más es la influencia friccional. A parte de disminuir su velocidad, también influye en su dirección. El efecto de la fricción sobre la dirección del viento se debe a la relación existente entre la velocidad del viento y la fuerza de Coriolis.

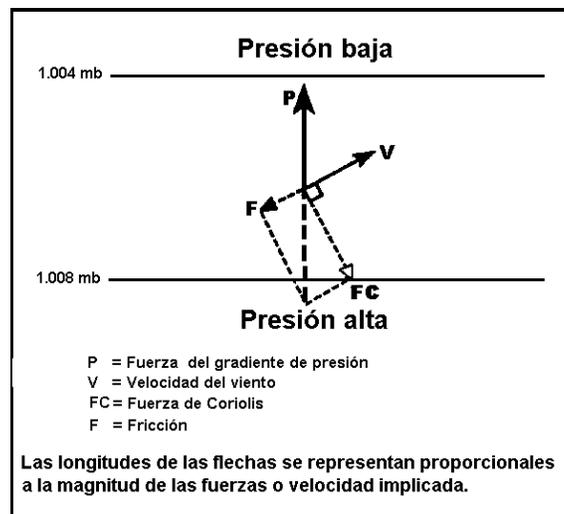


Figura 4. 4. Equilibrio de fuerzas entre la fuerza de Coriolis y la fricción sobre la FGP.

Con la fricción, la fuerza de Coriolis decrece en relación con la FGP por lo que predomina y desplaza el viento hacia la presión baja. La dirección del viento se dirige hacia la presión baja hasta que el vector resultante de la fuerza friccional y la fuerza de Coriolis equilibran de manera exacta la FGP. El efecto de la fricción en el viento influye significativamente en el transporte de los

contaminantes del aire. Los contaminantes liberados en diferentes alturas de la atmósfera pueden moverse en direcciones diferentes.

Sistemas de Presión

Los vientos superficiales se desplazan en dirección contraria a las agujas del reloj alrededor de los sistemas de presión baja (ciclones) en el hemisferio norte. Este mismo balance conduce al aire en la dirección de las agujas del reloj alrededor de sistemas de presión alta (anticiclones) en el hemisferio norte. En los niveles superiores de la atmósfera donde se remueven las fuerzas friccionales, el aire se mueve en forma paralela con las isobaras.

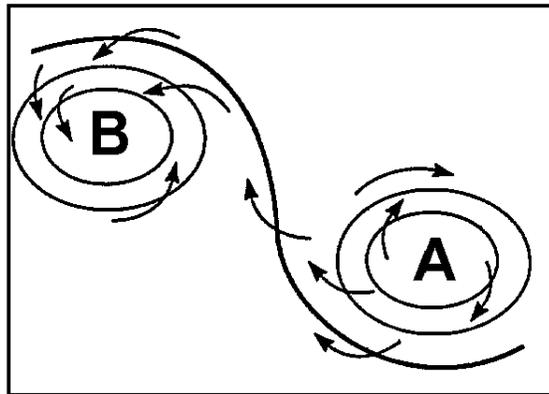


Figura 4. 5. Flujo del aire superficial alrededor de sistemas de alta y baja presión.

Circulación general

La circulación general representa el flujo promedio de aire alrededor del mundo. El estudio de los patrones de flujo promedio del viento puede servir para identificar los patrones predominantes de circulación en ciertas latitudes y entender sus causas. Las variaciones horizontales de la temperatura atmosférica, causadas por el calentamiento irregular, determinan diferencias de presión que da origen a la circulación atmosférica. Si la tierra no rotara y estuviera compuesta por

una superficie solida uniforme (ideal), se podría observar un modelo de circulación muy predecible del ecuador a los polos.

El aire del ecuador sería mayor que el de los polos, más cálido y ligero, y se elevaría debido a la convección. A medida que el aire se eleva, se producen tormentas eléctricas que liberan más calor y hacen que el aire continúe elevándose hasta que llega a la capa superior de la atmósfera. En este punto, el aire empezaría a moverse hacia las regiones polares y se enfriaría a medida que se traslade. En los polos, el aire frío denso descendería a la superficie y volvería a fluir hacia el ecuador. El efecto de Coriolis es un factor principal que explica los patrones reales del flujo de aire alrededor de la tierra.

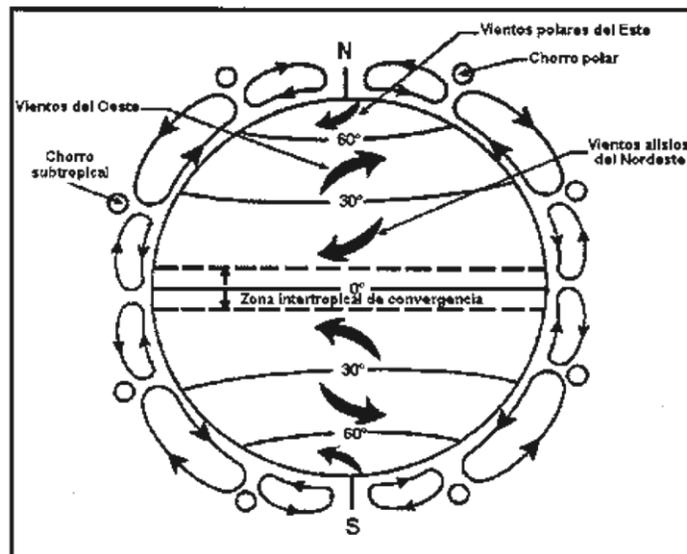


Figura 4. 6. Circulación atmosférica general.

Debido al efecto Coriolis, los vientos soplan desde el noreste en el hemisferio norte de forma constante, llamados *vientos alisios*. Estos vientos convergen alrededor del ecuador en una región denominada zona intertropical de convergencia (ZITC). La otra parte del aire superficial se dirige hacia los polos. La fuerza de Coriolis desvía estos vientos hacia el este, denominados *vientos prevalentes del oeste o vientos del oeste*. Entre las latitudes de 30° a 60° los sistemas móviles de

presión y las masas de aire asociadas ayudan a transportar la energía. Esta humedad se condensa y libera la energía que ayuda a calentar el aire en las latitudes del norte.

Las áreas que se encuentran entre las latitudes de 60° y los polos, prevalecen los *vientos polares del este*, formando una zona de aire que sopla hacia el sudeste en el hemisferio norte hasta que se encuentran con los del oeste, más cálidos. La interfaz entre los polares del este y los prevalentes del oeste es el *frente polar*, viajando del oeste al este y ayuda al aire frío a desplazarse hacia el sur y al aire húmedo y cálido, al norte.

A medida que el aire húmedo y cálido ejerce una presión sobre los del este, se desarrolla un *clima tempestuoso*. El frente polar generalmente está acompañado por nubes y precipitaciones. Las bandas más estrechas de vientos de alta velocidad, conocidas como *corrientes de chorro*, se desarrollan cuando hay grandes diferencias horizontales de temperatura. La dirección de la corriente de chorro es de este a oeste y descendente (de norte a sur), siguiendo al límite entre el aire cálido y frío.

Masas de aire

Son fenómenos de escala macro, son volúmenes de aire relativamente homogéneos con respecto a la temperatura y humedad, y adquieren las características de la región sobre la que se forman y se desplazan. Los contaminantes liberados en una masa de aire se desplazan y dispersan dentro de ella. Se clasifican como: marítimas o continentales, árticas, polares o tropicales según la latitud y el origen. La frontera entre las masas de aire con características diferentes se denomina frente, la cual es una zona de transición que abarca varias millas. La temperatura es una propiedad básica de las masas de aire y la humedad es la segunda propiedad básica de una masa de aire.

Influencias topográficas

Las características físicas de la superficie terrestre se denominan rasgos del terreno o topografía. No solo influyen en el calentamiento de la tierra y del aire que la rodea sino también en el flujo de aire, afectando sobre todo el flujo del aire relativamente cercano a la superficie terrestre. Estos rasgos se pueden agrupar en cuatro categorías:

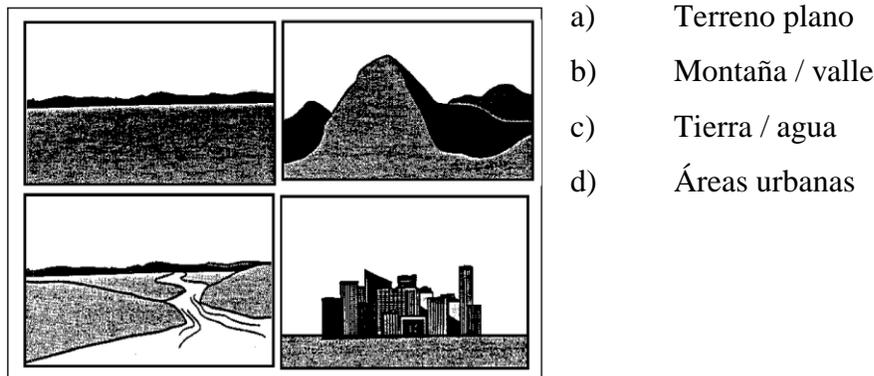


Figura 4. 7. Topografía.

Además, afectan a la atmósfera de dos maneras: térmicamente (a través del calor) y geoméricamente (mecánicamente). La turbulencia térmica se produce por el calentamiento diferencial. La turbulencia mecánica es causada por el viento que influye sobre objetos de tamaños y formas diferentes.

Algunas áreas se consideran planas para propósitos topográficos. En esta categoría están incluidos los océanos, aunque tienen una textura de superficie y los rasgos ligeramente ondulantes del terreno. Estos rasgos inducen un efecto friccional en la velocidad del viento y producen el perfil el viento con altura, esto es, la velocidad de viento aumenta con la altitud en cada uno de los tres tipos de terrenos. Las áreas urbanas con construcciones densas y edificios altos ejercen una mayor fuerza friccional sobre el viento, haciendo que disminuya, cambie de dirección y se haga más

turbulento. Por lo tanto, los vientos de gradiente alcanzan mayores altitudes cuando se producen sobre áreas urbanas que cuando lo hacen sobre el nivel del suelo.

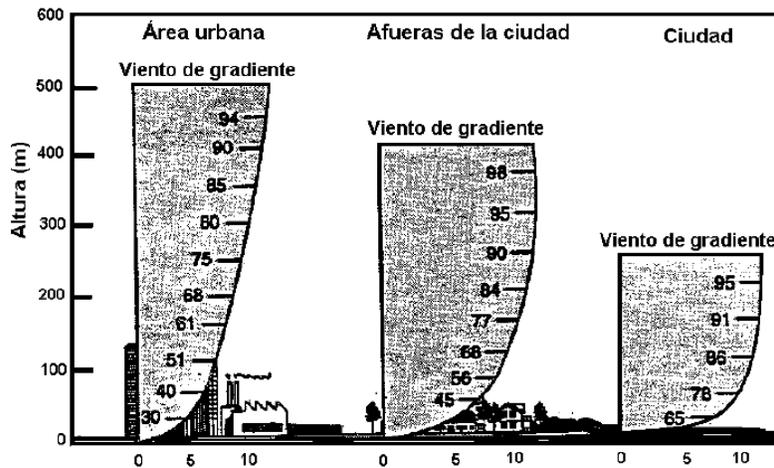


Figura 4. 8. Ejemplos de variación del viento según la altura sobre diferentes superficies.

La turbulencia térmica sobre un terreno plano se debe a rasgos naturales o producidos por el hombre. El aire se eleva sobre los objetos calentados en cantidades variables por convección.

4.4. Circulación vertical y estabilidad atmosférica

La circulación vertical es igualmente importante en la meteorología de la contaminación del aire ya que el grado en que se produce permite determinar la cantidad de aire disponible para la dispersión de los contaminantes. Esto se puede atribuir a sistemas de presión alta y baja, a la elevación del aire sobre terrenos o frentes y a la convección.

Principios relacionados con la circulación vertical

- a) Porción de aire. - Teóricamente es infinitesimal, es un cuerpo nítido de aire que actúa como un todo, no se mezcla con el aire circundante, con temperatura uniforme, análoga al aire contenido en un globo.

- b) Factores de flotabilidad. - La temperatura y la presión atmosférica influyen en la flotabilidad de las porciones de aire. La temperatura es directamente proporcional a la presión atmosférica. Una porción de aire que se vuelve más cálida que el aire circundante comienza a expandirse y enfriarse y, por ende, se hace menos densa. Esto hace que la porción se eleve o flote, o sea, disminuye su presión atmosférica y también su temperatura. En sentido inverso, el aire frío desciende y se calienta. El grado en el que una porción de aire se eleva o desciende depende de la relación existente entre su temperatura y la del aire circundante.
- c) Gradiente vertical de temperatura. - Se define como el gradiente en el que la temperatura del aire cambia con la altura. Una disminución de temperatura con la altura se define como un gradiente vertical negativo y un aumento de temperatura con la altura como un gradiente vertical positivo. El comportamiento de la atmósfera depende de la estabilidad atmosférica. Una *atmósfera estable* resiste la circulación vertical, es decir, el aire que se desliza verticalmente tiende a regresar a su posición inicial.
- d) Gradiente adiabático seco. - Una porción de aire más cálida que el aire circundante no transfiere calor a la atmósfera. Cualquier cambio de temperatura producido en la porción de aire se debe a aumentos o disminuciones de la actividad molecular interna, de tipo adiabático, es decir, solo al cambio de presión debido al movimiento vertical.
- La compresión da lugar al calentamiento, y la expansión al enfriamiento. Aumenta la presión, genera un gradiente adiabático negativo, disminuye la presión, genera un gradiente adiabático positivo. El *gradiente adiabático seco* es fijo, totalmente independiente de la temperatura del aire ambiente. Si sube, se enfría a razón de $9.8^{\circ}\text{C}/\text{Km}$. Un diagrama adiabático simple demuestra la relación entre la elevación y la temperatura.

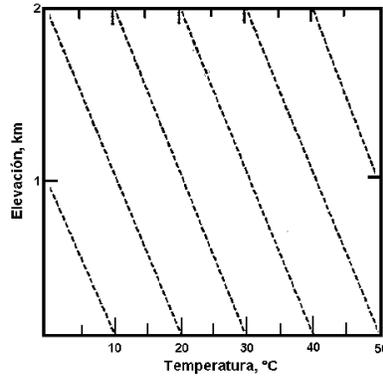


Figura 4. 9. Gradiente vertical adiabático seco.

- e) Gradiente vertical adiabático húmedo. - Al elevarse una porción de aire seco que contiene vapor de agua, seguirá enfriándose en el gradiente vertical adiabático seco hasta que alcance su temperatura de condensación o punto de rocío. En este punto, la presión del vapor de agua iguala a la del valor de saturación del aire y una parte del vapor de agua se comienza a condensar. La condensación libera calor latente en la porción de aire, disminuyendo el gradiente de enfriamiento. A este cambio se le conoce como *Gradiente vertical adiabático húmedo*. Este nuevo gradiente depende de la presión y la temperatura, no es constante como el gradiente adiabático seco.

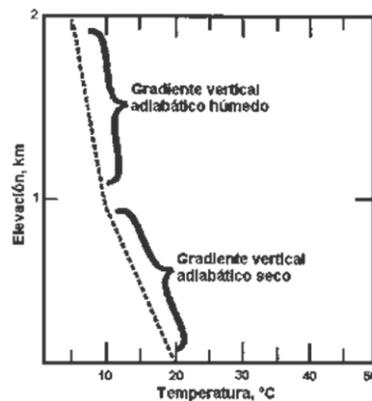


Figura 4. 10. Gradiente vertical adiabático húmedo.

- f) Gradiente ambiental. - El verdadero perfil de la temperatura del aire ambiental muestra el *gradiente vertical del ambiente*, denominado *gradiente vertical prevalente o atmosférico* y generalmente se considera que consiste una disminución en la temperatura con la altura. Es

particularmente importante, ya que la temperatura del aire circundante determina el grado en el que una porción de aire se eleva o desciende.

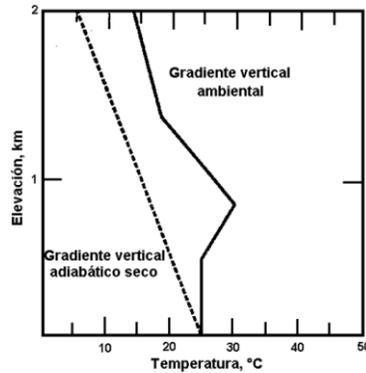


Figura 4. 11. Gradiente vertical ambiental.

El fenómeno producido cuando la temperatura aumenta con la altitud se conoce como inversión de la temperatura, se presenta en elevaciones de 200 a 350 m. Es importante principalmente en la contaminación del aire porque limita la circulación vertical de este.

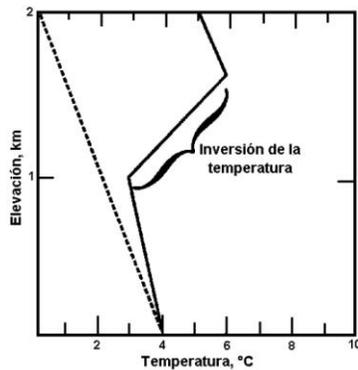


Figura 4. 12. Inversión de la temperatura.

- g) Altura de mezcla. - Hay tres maneras en que el gradiente adiabático influye en la flotabilidad. La primera es cuando la porción de aire es más cálido y menos denso que el aire circundante haciendo que siga subiendo. La segunda forma es cuando la porción del aire tiene una menor temperatura y es más denso que el aire provocando que descienda. Finalmente, cuando la porción de aire tiene la misma temperatura y densidad que el aire circundante, no se moverá.

El gradiente vertical ambiental controla el grado en el que una porción de aire puede elevarse o descender. El punto en el que la porción del aire que se enfría en el gradiente vertical (20° a 10°C) adiabático seco intersecta la “línea” perfil de la temperatura ambiental se conoce como altura de mezcla. Siendo el nivel máximo al que la porción de aire puede descender. El aire que se encuentra debajo de la altura de mezcla conforma la capa de mezclado. Mientras más profunda sea esta capa, mayor será el volumen del aire disponible para la dispersión de los contaminantes.

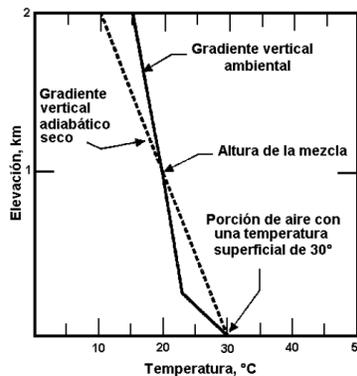


Figura 4. 13. Altura de mezcla.

h) Estabilidad atmosférica. - El grado de estabilidad se determina a partir de la diferencia de temperatura entre una porción de aire y el aire circundante. Este contraste puede hacer que suba o baje el aire, se caracteriza por cuatro condiciones básicas:

1. Condiciones estables: El movimiento vertical se inhibe.
2. Condiciones inestables: La porción de aire tiende a moverse continuamente hacia arriba o hacia abajo.
3. Condiciones neutrales: No propician ni inhiben el movimiento de aire después del gradiente de calentamiento o enfriamiento adiabático.

4. Condiciones extremadamente estables: El aire frío cercano a la superficie es “entrampado” por una capa de aire cálido sobre este, provocando la inversión, evitando la circulación vertical del aire.

i) Condiciones inestables.- Una porción de aire que empieza a elevarse se enfriará en el gradiente vertical adiabático seco hasta que alcance su punto de rocío, el cual lo hará cambiar al gradiente vertical adiabático húmedo. Esto supone que la atmósfera circundante tiene un gradiente vertical mayor que el gradiente vertical adiabático, de modo que la porción que se eleva seguirá más cálida que el aire circundante. Este es un *gradiente superadiabático*.

A medida que el aire se eleva, el aire más frío se mueve por debajo. La superficie terrestre puede hacer que se caliente y empiece a elevarse nuevamente. Haciendo que el aumento de la circulación vertical en ambas direcciones, produciendo una mezcla vertical considerable.

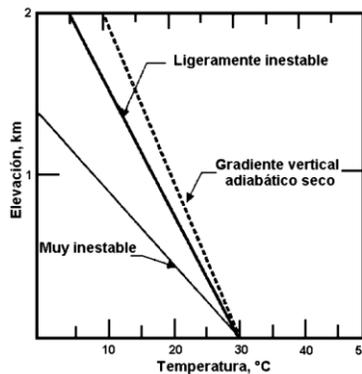


Figura 4. 14. Condiciones inestables.

Las condiciones inestables más comunes se producen durante los días soleados con vientos de bajas velocidades y fuerte insolación.

j) Condiciones neutrales. - Cuando el gradiente vertical de la temperatura del ambiente es el mismo que el gradiente vertical adiabático seco, la atmósfera se encuentra en *estabilidad neutral*. Es importante porque constituye el límite entre las condiciones estables y las

inestables. Se produce cuando los días con viento o cuando una capa de nubes impide el calentamiento o enfriamiento fuerte de la superficie terrestre.

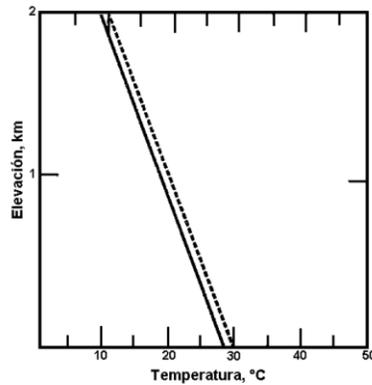


Figura 4. 15. Condiciones neutrales.

- k) Condiciones estables. - Cuando el gradiente vertical ambiental es menor que el gradiente vertical adiabático, el aire es estable y resiste la circulación vertical. Este es un *gradiente vertical subadiabático*. El aire que se eleva verticalmente permanecerá más frío y por lo tanto, más denso que el aire circundante. Una vez que se retira la fuerza de elevación, la muestra de aire que se elevó regresa a su posición original. Las condiciones estables se producen durante la noche, cuando el viento es escaso o nulo.

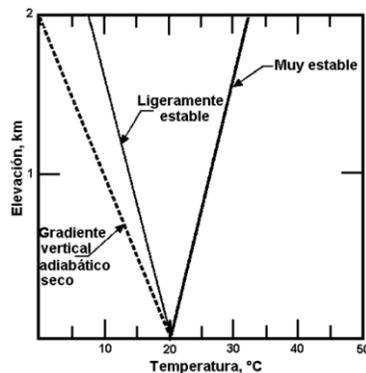


Figura 4. 16. Condiciones estables.

- l) Estabilidad e inestabilidad condicional. - La inestabilidad condicional vertical ambiental es mayor que el gradiente vertical adiabático húmedo pero menor que el gradiente seco.

Supongamos que una porción de aire ascendente se enfría en el gradiente adiabático seco. Sin embargo, muchas veces la porción de aire se satura y empieza a enfriarse más lentamente en el gradiente vertical adiabático húmedo. Este cambio en el gradiente de enfriamiento puede modificar las condiciones de estabilidad. Las condiciones estables se producen hasta el nivel de condensación y las inestables, sobre este.

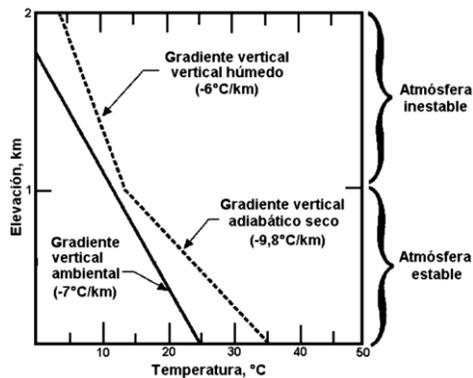


Figura 4. 17. Estabilidad condicional.

m) Inversiones. - Una inversión se presenta cuando la temperatura del aire aumenta con la altura. Las plumas emitidas a las capas de aire que experimentan una inversión (capas invertidas) no se dispersan mucho al ser transportadas por el viento. Las plumas emitidas por encima o por debajo de una capa invertida no penetran en ella, sino que quedan entrampadas. Por lo general las altas concentraciones de contaminantes del aire están relacionadas con las inversiones, ya que estas inhiben la dispersión de las plumas. Los cuatro tipos de inversión principales se deben a diversas interacciones atmosféricas y presentan diferentes periodos de duración.

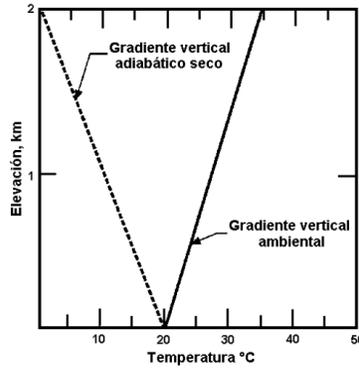


Figura 4. 18. Temperatura de inversión.

- Inversiones por radiación. - La inversión por radiación es el tipo más común de inversión superficial y se produce con el enfriamiento acelerado de la superficie terrestre. Generalmente se produce desde las horas finales de la tarde hasta las primeras de la mañana, con el cielo despejado y vientos calmados, cuando el efecto de enfriamiento es mayor. Los ciclos de inestabilidad a lo largo del día e inversiones durante la noche son relativamente comunes, por lo que son de corta duración. Los contaminantes que quedan atrapados debido a las inversiones son dispersados por la vigorosa mezcla vertical producida cuando la inversión se interrumpe después del amanecer.

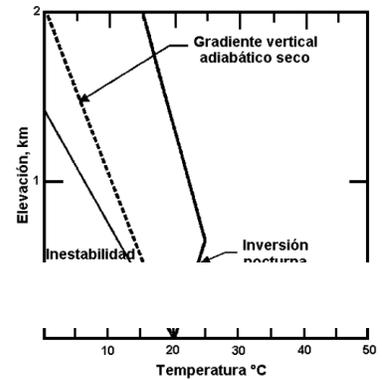


Figura 4. 19.
Inversión por radiación.

En condiciones adecuadas, pueden generar varios días de inversión por radiación con altas concentraciones de contaminantes.

- Inversión por subsidencia. - Generalmente está asociada con los anticiclones (sistemas de alta presión). A medida que el aire desciende, la mayor presión existente en latitudes menores lo comprime y calienta en el gradiente vertical adiabático seco. Durante el día, la capa de inversión resultante se eleva a cientos de

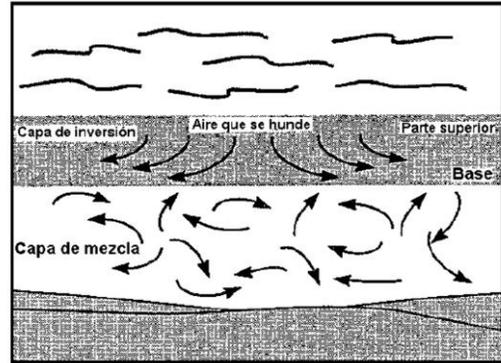


Figura 4. 20. Inversión por subsidencia.

metros sobre la superficie. Durante la noche, la base de una inversión por subsidencia generalmente desciende, debido al enfriamiento del aire superficial. Los días despejados y sin nubes característicos de los anticiclones propician las inversiones por radiación, pudiéndose producir una inversión superficial durante la noche y una elevada durante el día. Las inversiones por subsidencia tienen una duración relativamente larga. Cuando un anticiclón se estanca, los contaminantes emitidos dentro de la capa de mezcla no se pueden diluir. Es probable que las concentraciones de contaminantes se eleven durante algunos días.

- Inversión frontal. - En el avance de cada frente, el aire cálido desplaza al frío, de modo que se produce una circulación vertical mínima en la capa de aire frío más cercana a la superficie. La fuerza de la inversión depende de la diferencia de temperatura entre las dos masas de aire. Como el movimiento es horizontal, los efectos de la

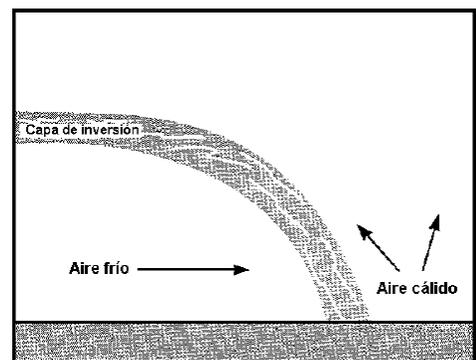


Figura 4. 21. Inversión frontal por frente frío.

inversión generalmente duran poco y la falta de movimiento vertical suele compensarse con los vientos relacionados con el paso frontal.

- Inversión por advección. - Está relacionada con el flujo horizontal del aire cálido. Cuando este se mueve sobre una superficie fría, los procesos de conducción y convección enfrían el aire más cercano a la superficie y conducen a una inversión basada en la superficie. Es más común en el invierno, o bien, cuando el aire cálido es impulsado sobre la parte superior de una capa de aire frío.

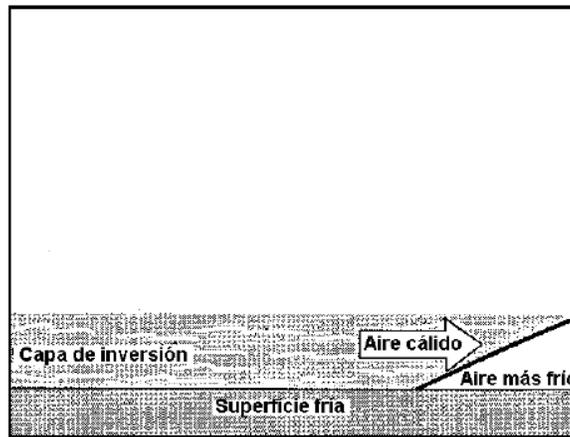


Figura 4. 22. Inversión por advección en la superficie.

4.5. Instrumentos meteorológicos

La medición y el registro de las variables meteorológicas permiten obtener información necesaria para controlar la descarga de los contaminantes del aire en la atmósfera y para comprender el transporte y la dispersión de los contaminantes emitidos al aire. Las variables meteorológicas que influyen en el transporte y la dispersión del aire incluyen la intensidad de la turbulencia atmosférica, la velocidad y la dirección del viento, a esto se le conoce como estabilidad atmosférica. La altura de la mezcla, que también influye en el transporte y la dispersión de los contaminantes del aire, se calcula a partir de datos reportados a través de radiosondas.

Velocidad del viento

El viento puede ser considerado como una variable primaria por naturaleza. Por lo general, la velocidad (magnitud del vector) y la dirección (orientación) se consideran como variables independientes. La velocidad del viento determina la cantidad de dilución inicial que experimenta la pluma. Por lo tanto, la concentración en una pluma está directamente relacionada con la velocidad del viento, así como la altura de la elevación. A medida que la velocidad del viento aumenta, la elevación de la pluma disminuye. La velocidad del viento se usa junto con otras variables para derivar las categorías de la estabilidad atmosférica usadas en aplicaciones de los módulos de la calidad del aire.

Los dos instrumentos principales para medir la velocidad del viento son *el anemómetro rotativo de cubeta* y *el anemómetro de hélice*. Ambos equipos constan de dos subconjuntos: el sensor y el transductor. El sensor es el dispositivo que rota por acción de la fuerza del viento y el transductor es el que genera la señal eléctrica que se procesará y almacenará.

- Anemómetro rotativo de cubetas. Consta de tres cubetas cónicas o hemisféricas montadas simétricamente sobre un eje vertical de rotación (Figura 4. 23 a).
- Anemómetro con paletas de orientación y hélices con montura fija. Consta generalmente de una hélice de dos, tres o cuatro paletas radiales que rotan sobre un eje de giro horizontal frente al viento. Algunos no tienen paletas móviles por lo que emplean hélices ortogonales de montura, para determinar los componentes vectoriales. Para determinar el componente vertical del viento, se pueden emplear una tercera hélice con una montura fija que gira sobre un eje vertical (Figura 4. 23 b).

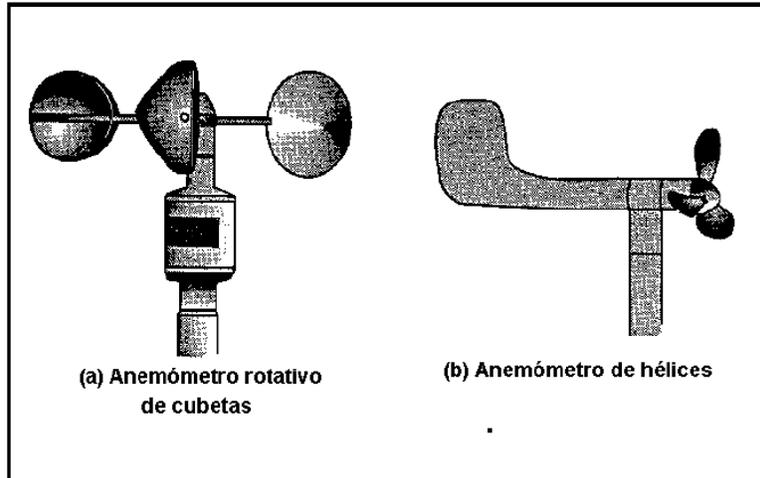


Figura 4. 23. Tipos de anemómetros.

- Transductores de velocidad del viento

La selección de un transductor depende del grado de sensibilidad requerido y del tipo de registro o lectura de datos que se necesita. Los cuatro transductores más utilizados son: generador DC, generador AC, contacto eléctrico y rayo luminoso interrumpido. Es importante usar instrumentos con bajos niveles umbrales al inicio como anemómetros que emplean generadores de DC miniaturizados. Los transductores con generadores de AC eliminan la fricción de las escobillas, pero se debe tener cuidado en el acondicionamiento de la señal para evitar la alteración de las oscilaciones en la señal de salida a bajas velocidades. Los transductores de contacto eléctrico se usan para medir el pasaje total del viento (flujo continuo del viento) en lugar de velocidades instantáneas, empleados para calcular la velocidad promedio en un periodo. No recomendados para estudios sobre dispersión de contaminantes. El transductor de rayo luminoso interrumpido (troceador de luz) se usa en aplicaciones de calidad del aire, siendo más sensible a velocidades menores del viento. La frecuencia de salida de un generador AC o transductor troceador de luz se puede transmitir a través de un acondicionador de señal y convertirse en una señal analógica para diversos dispositivos.

Dirección del viento

La dirección del viento se define como la orientación del vector en la horizontal. Para propósitos meteorológicos se define como la dirección desde la cual sopla el viento y se mide en grados en la dirección de las agujas del reloj a partir del norte verdadero. La dirección del viento determina la dirección del transporte de una pluma emitida.

- a) Paletas de viento. - Las paletas de viento señalan la dirección desde la cual sopla. Pueden ser de formas y tamaños diferentes. Por lo general son de acero inoxidable, aluminio o plástico. Los componentes horizontales (azimut) y verticales (elevación) de la dirección del viento se pueden medir con una paleta bidireccional, la cual consta de una aleta anular y dos aletas planas perpendiculares entre sí, contrapesadas y montadas sobre un cordón.

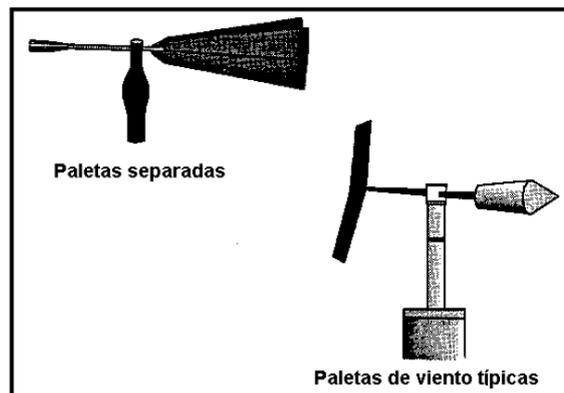


Figura 4. 24. Paletas de viento.

- b) Anemómetros de hélice con montura fija

Este instrumento es otro método para medir la dirección horizontal y/o vertical del viento. La dirección horizontal del viento se puede determinar mediante componentes ortogonales de la velocidad del viento. La velocidad vertical también puede ser medida al agregar una tercera hélice montada verticalmente. También es conocido como *anemómetro uvw*.

c) Transductores de dirección del viento

Muchos transductores del tipo conmutador simple se valen del contacto del cepillo para dividir la dirección del viento en ocho o dieciséis sectores. Sin embargo, para el estudio de la calidad del aire es mejor usar transductores que provean al menos una resolución de 10° (36 sectores) en la medición de la dirección del viento. Un transductor comúnmente usado es el *potenciómetro*.

Ubicación y exposición de los instrumentos de medición del viento

Estos se deben colocar lejos de obstrucciones que puedan influir en las mediciones. No se debe permitir que consideraciones secundarias como la accesibilidad y la seguridad, comprometan la calidad de los datos. La altura estándar de exposición de los instrumentos del viento en un terreno abierto es de *10 metros*. El terreno abierto se define como un área donde la distancia entre el instrumento y cualquier obstrucción (árboles, edificios, etc.) es al menos diez veces la altura de la obstrucción. En los casos en que la descarga de emisión se produce generalmente sobre 10 metros, es probable que se requieran mediciones adicionales del viento en mayores elevaciones. Se recomienda colocar los instrumentos del viento sobre una torre de rejillas. Se deben ubicar en la parte superior de esta o, si están en un lado de la torre, se deben ubicar en botavaras a una distancia de al menos dos veces el diámetro/diagonal de la torre, extendidas hacia afuera en dirección del viento prevalente.

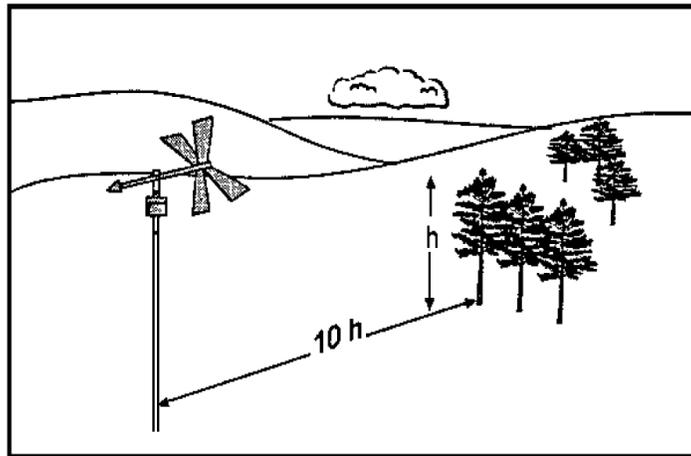


Figura 4. 25. Criterios de distancia para la ubicación de instrumentos de medición del viento.

La temperatura y la diferencia de temperatura

Son útiles tanto la temperatura del aire ambiental en un solo nivel (1.5 – 2 metros sobre el suelo) como la diferencia de temperatura entre dos niveles (2 m y 10 m). Estas medidas sirven para realizar cálculos sobre la elevación de la pluma y para determinar la estabilidad atmosférica.

a) Clases de sensores de temperatura

Las tres clases principales de sensores de temperatura se basan en:

- Exposición térmica
- Cambio de resistencia
- Propiedades termoeléctricas de diversas sustancias como función de la temperatura

Un tipo de sensor común en los programas de medición meteorológica *in situ* es el detector de temperatura por resistencia (RTD). Otro tipo de termómetro es el termistor, hecho a partir de una mezcla de óxidos de metal fusionados entre sí. El principio de operación de los termopares es el flujo de corriente entre dos metales diferentes y depende de la temperatura, y exigen

ciertos requerimientos especiales para evitar corrientes de inducción de fuentes cercanas que podrían ocasionar errores en la medición, también son susceptibles al voltaje espurio causado por la humedad.

- b) Ubicación y exposición de los instrumentos para medir la temperatura y la diferencia de temperatura

La temperatura del aire ambiental (superficial) se debe medir a una altura de 2 metros. La altura estándar para medir la diferencia de temperatura es 2 y 10 metros. El sensor de la temperatura se debe ubicar en un área abierta, plana y bien ventilada de al menos 9 m de diámetro. Además, los sensores se deben colocar a una distancia de al menos cuatro veces la altura de cualquier obstrucción y al menos 30 metros de áreas pavimentadas amplias. La superficie donde se localice el sensor debe estar cubierta por una capa natural de tierra o pasto y estar lejos de áreas con agua estancada. Los instrumentos deben estar blindados para protegerlos de la radiación térmica, y bien ventilados con sistemas apropiados.

Radiación solar

Está relacionada con la estabilidad de la atmósfera. Los datos sobre la cobertura y la altitud de las nubes proporcionan una estimación indirecta de los efectos de la radiación solar y se usan junto con la velocidad del viento para derivar una categoría de estabilidad atmosférica. El instrumento más usado en la medición de la radiación solar es el *piranómetro*, mide la radiación directa y difusa sobre una superficie horizontal. Otro tipo de sensor es el *radiómetro neto*, diseñado para medir la diferencia entre la radiación ascendente (solar) y la descendente (terrestre), a través de una superficie horizontal. La aplicación básica es determinar la radiación diurna y nocturna como un indicador de estabilidad.

a) Ubicación y exposición de los instrumentos para medir la radiación solar

Los piranómetros usados para medir la radiación incidente (solar) se deben colocar en áreas abiertas con una amplia vista del cielo hacia todas las direcciones y durante todas las estaciones, además donde no se produzcan obstrucciones que proyecten una sombra sobre el sensor en cualquier momento, evitar ponerlos sobre paredes de color claro y fuentes artificiales de radiación. Es recomendable colocarlo sobre una plataforma elevada, a 1 metro sobre el nivel del suelo.

Altura de mezcla

La profundidad vertical de la atmósfera donde se produce el mezclado se denomina *capa de mezcla*. La parte superior de esta capa se conoce como *altura de mezcla*. Esta determina el alcance vertical del proceso de dispersión de los contaminantes liberados debajo de ella, puesto que limita la dispersión vertical de los contaminantes. Las alturas de mezclado producidas por la mañana y por la tarde se estiman a partir de los perfiles de temperatura vertical tomados tanto a la salida y puesta del sol, como de temperatura superficial. Los perfiles de la temperatura vertical se miden con *radiosondas*, instrumentos transportados elevados a través de globos más ligeros que el aire. Para los modelos de la calidad del aire, las alturas de mezcla por hora se pueden estimar a partir de los valores de altura de mezcla tomados dos veces al día y las categorías de estabilidad atmosférica de cada hora.

Un SODAR (Sound Detection And Ranging) transmite un pulso fuerte acústico a la atmósfera y capta la parte del pulso que se expande y regresa. Un radar perfilador de vientos usa principios de operación similares al SODAR, este transmite pulsos electromagnéticos. Esto con la finalidad de

desarrollar bases de datos meteorológicos requeridos como aporte de SODAR y de los radares perfiladores de viento también pueden servir para estimar la altura del mezclado.

Exactitud del sistema

La exactitud del sistema es la cantidad en que una variable medida se desvía de un valor aceptado como válido o estándar. La Tabla 4 - 4 enumera valores de exactitud recomendados para los sistemas *in situ* de monitoreo meteorológico destinados a aplicaciones de estudios de calidad del aire, también incluye las resoluciones recomendadas de medición.

Tabla 4 - 4. Valores de exactitud y resoluciones recomendadas para sistemas meteorológicos.

Variable meteorológica	Exactitud de la variable	Resolución de la medición
Velocidad del viento	$\pm (0,2 \text{ m/s} + 5\% \text{ del observado})$	0,1 m/s
Dirección del viento	± 5 grados	1 grado
Temperatura ambiental	$\pm 0,5$ °C	0,1 °C
Diferencia de la temperatura vertical	$\pm 0,1$ °C	0,02 °C
Radiación solar	$\pm 5\%$ del observado o W/m^2 *	10 W/m^2
Tiempo	± 5 minutos	

*El que sea mayor

Fuente: U.S. EPA 1987 (revisado en febrero de 1993).

4.6. Modelos de dispersión

Casi todas las actividades humanas y los procesos naturales llevan a cierta forma de contaminación de aire, de la cual, no toda causa problemas, pero muchas formas lo son. Se ha estimado que la contaminación del aire causa decenas de miles de muertes prematuras por año en América del Norte y cerca de un millón a nivel mundial (Ezzati et al, 2002). La concentración a la cual la contaminación del aire alcanza a la población depende del grado de dispersión del contaminante en el aire. La dispersión es la dilución de un compuesto en un fluido como resultado de

movimientos aleatorios del fluido y sus moléculas, referido más como difusión o difusión turbulenta.

El modelado de dispersión de aire es una técnica poderosa para evaluar si una fuente de contaminación de aire crea un problema o no. Un problema de contaminación de aire puede definirse vagamente como una concentración ambiental de un contaminante del aire o una combinación de contaminantes del aire en cualquier lugar que exceda el nivel aceptable para esa ubicación. Existen múltiples razones del uso de modelos de dispersión, según la aplicación:

- No es posible medir la calidad del aire en cada una de las ubicaciones relevantes de forma continua.
- Si una nueva fuente de contaminación es planeada, los modelos de dispersión del aire pueden predecir el impacto de esta fuente en la calidad del aire.
- Cuando la contaminación del aire es localizada, los modelos de dispersión pueden ayudar a determinar la fuente.
- Cuando una fuente crea un problema de contaminación, los modelos de dispersión pueden determinar la reducción de emisión necesaria para resolver el problema.
- Los modelos de dispersión pueden ser usados para planear respuestas a emergencias como fugas accidentales.

Un problema de contaminación del aire nunca es el resultado de un evento aislado, pero es el resultado de una cadena de eventos: desde la formación del contaminante en un proceso de emisión (con o sin tratamiento residual de gas), la dispersión y la transformación química en la atmósfera, hasta ser inhalado por el receptor, hasta un efecto de pérdida de salud o enfermedad.

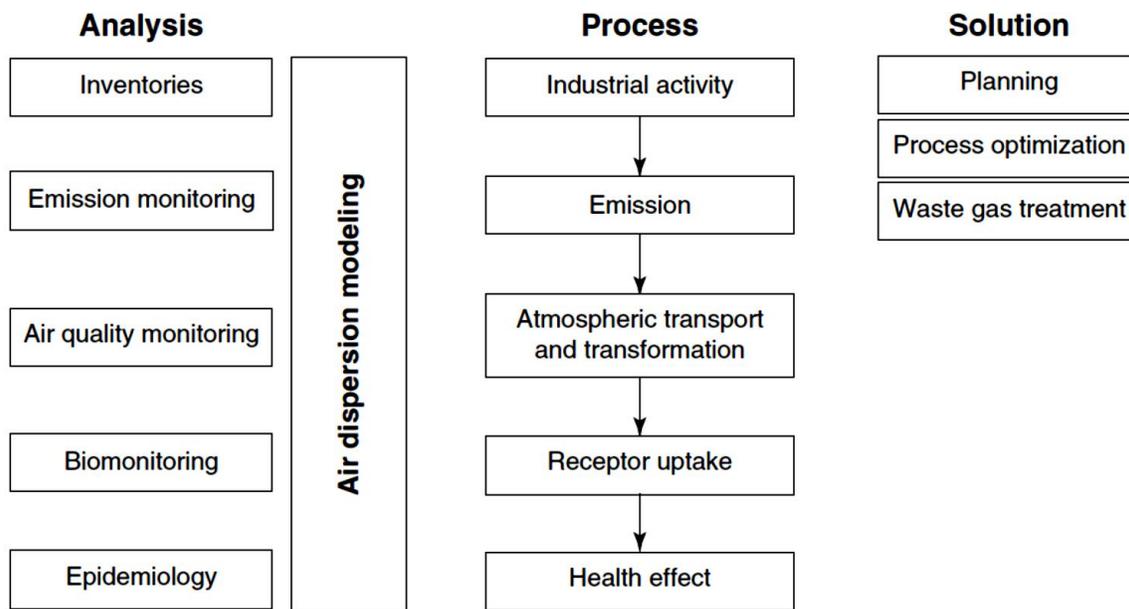


Figura 4. 26. Contexto del modelado de dispersión.

La contaminación del aire es influenciada por el clima (velocidad del viento, dirección del viento, temperatura, amanecer, lluvia), el terreno (edificios, valles, montañas, superficies de agua), la fuente (altura de la chimenea, diámetro, temperatura de salida del gas y velocidad, concentración del contaminante), y las propiedades físicas y químicas del contaminante (reactividad, solubilidad). Con base en la referencia que la atmósfera es turbulenta y caótica, las concentraciones del contaminante no son constantes aun cuando la fuente y el clima lo sean, por lo que se puede considerar que un modelo de dispersión es exitoso cuando se cumplen los siguientes criterios:

- La concentración predictiva promedio-hora se encuentra dentro de un factor de 2 de la concentración actual en la mayoría del tiempo.
- Durante mucho tiempo, la concentración promedio predicha por el modelo es cercana a la concentración promedio actual.
- Cuando se predicen concentraciones en diferentes ubicaciones y en diferentes tiempos están ubicadas de menor a mayor, y se hace lo mismo con las concentraciones medidas en

las mismas ubicaciones y tiempo, entonces, se obtiene una distribución muy similar.

Puntos correspondientes en espacio y tiempo no necesariamente tienen la misma posición.

La dispersión de las plumas y el modelado de la calidad del aire en exteriores

Los contaminantes ingresan a la atmósfera de diversas maneras. El tipo de descarga de contaminación que ha recibido más atención es la que se libera desde fuentes puntuales como chimeneas. Su función es descargar los contaminantes a suficiente altura desde la superficie terrestre para que estos puedan dispersarse bien en la atmósfera antes de llegar al suelo. A medida que la pluma viaja, se extiende y dispersa. Hay muchos factores que influyen en el comportamiento de una pluma contaminante: Velocidad del viento, estabilidad atmosférica, ocurrencia de inversión térmica, terreno, temperatura de la pluma, velocidad de salida del viento, obstáculos cercanos a la fuente.

a) Elevación de la pluma.

A medida que los gases de escape turbulentos son emitidos por la pluma, se mezclan con el aire del ambiente, denominado como *arrastre*. Durante el cual, la pluma aumenta su diámetro mientras viaja a sotavento. Al entrar en la atmósfera, estos gases tienen un *momentum*. Muchas veces se calientan y se vuelven más cálidos que el aire externo. En estos casos, los gases emitidos son menos densos que el aire exterior, y por lo tanto, tienden a flotar. La combinación del momentum y la flotabilidad de los gases hacen que estos se eleven. Esto se conoce como *elevación de la pluma*, permitiendo que los contaminantes emitidos al aire en esta corriente de gas se eleven a una altura mayor en la atmósfera. La altura final de la pluma, conocida como *altura efectiva de chimenea (H)*, es la suma de la altura física de la chimenea (h_s) y la elevación de la pluma (Δh). La elevación de la pluma depende de las características físicas de la chimenea

y del efluente. La diferencia de temperatura entre el gas de la chimenea (T_s) y el aire ambiental (T_a) determina la densidad de la pluma. Además, la velocidad de los gases de la chimenea, que es una función del diámetro de la chimenea y de la tasa volumétrica del flujo de los gases de escape, determina el momentum de la pluma.

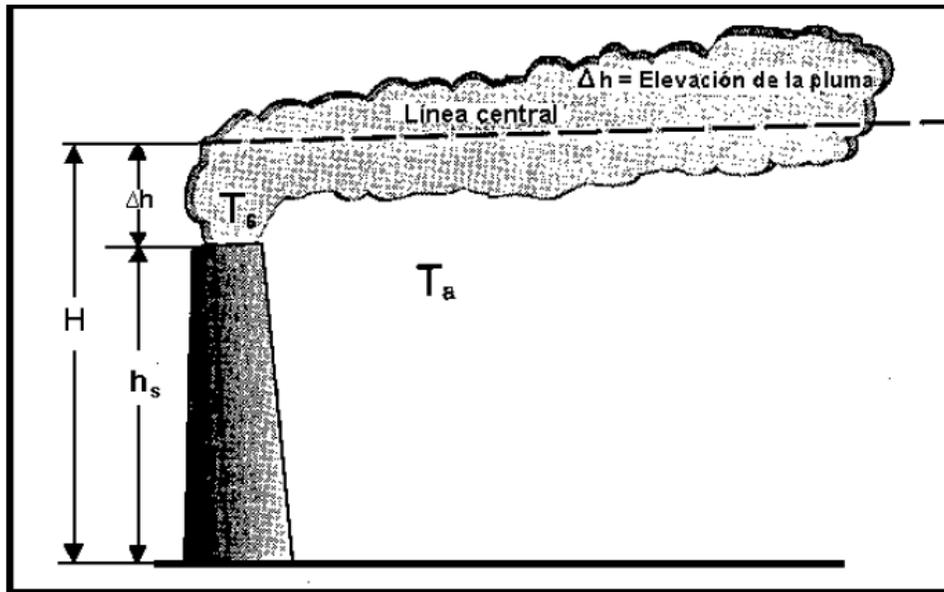


Figura 4. 27. Elevación de la pluma.

b) Momentum y flotabilidad

Dos características que influyen en gran medida a la elevación de la pluma son el momentum y la flotabilidad. La velocidad de salida de los gases de escape emitidos por la chimenea contribuye con la elevación de la pluma en la atmósfera. Este momentum conduce el efluente hacia el exterior de la chimenea a su punto en el que las condiciones atmosféricas empiezan a afectar a la pluma. La velocidad inicial de la pluma disminuye rápidamente debido al arrastre producido cuando adquiere un momentum horizontal. A mayor velocidad del viento, más horizontal será el momentum que adquirirá la pluma. Por lo general, aumenta con la distancia

sobre la superficie de la tierra. A medida que la pluma continúa elevándose, los vientos más fuertes hacen que se incline aún más. El punto donde la pluma parece llana puede ser una distancia considerable de la chimenea a sotavento. La velocidad del viento es importante para impulsar la pluma. Mientras más fuerte, más rápido será el serpenteo de la pluma.

La elevación de la pluma causada por su flotabilidad es una función de la diferencia de temperatura entre la pluma y la atmósfera circundante. En una atmósfera inestable, la flotabilidad aumenta a medida que se eleva, lo que aumenta la altura final de la pluma. En una atmósfera estable, la flotabilidad de la pluma disminuye a medida que se eleva. Por último, en una atmósfera neutral, permanece constante.

La pluma también pierde flotabilidad debido al viento. La mezcla dentro de la pluma arrastra el aire atmosférico hacia su interior. A mayor velocidad del viento, más rápida será esa mezcla. Durante los días con mucho viento, la pluma no se eleva muy alto sobre la chimenea.

c) Efectos de la fuente en la elevación de la pluma

Es posible que no se eleve la pluma libremente en la atmósfera. Algunos efectos aerodinámicos causados por el modo en el que se mueve el viento pueden impulsar a la pluma hacia el suelo en lugar de permitir que se eleve en la atmósfera. El flujo descendente de la chimenea puede producirse cuando la razón entre la velocidad de salida de la chimenea y la del viento es pequeña. La presión baja en la estela de la chimenea puede hacer que la pluma descienda detrás de la chimenea, por lo que la dispersión de los contaminantes disminuye. Según la altura de descarga de una pluma (altura de la chimenea), es probable que esta sea arrastrada hacia abajo en esta área de la estela. Esto se conoce como *flujo descendente aerodinámico o entre*

edificios de la pluma, provocando concentraciones elevadas de contaminantes inmediatamente a sotavento de la fuente.

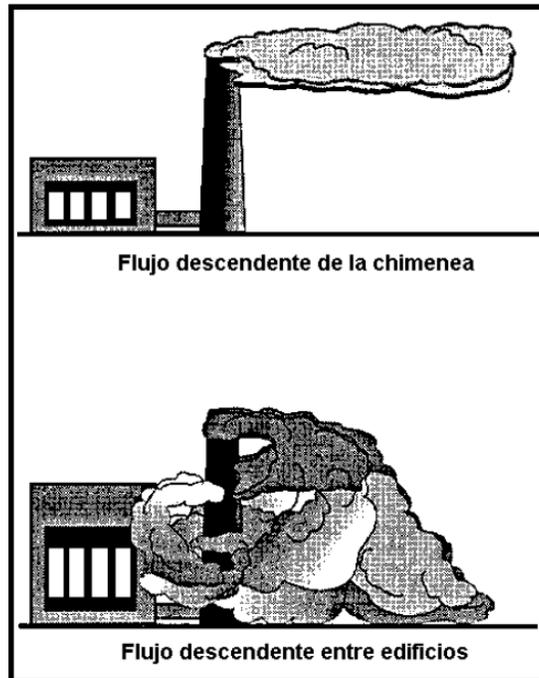


Figura 4. 28. Flujos descendientes de la pluma.

Fórmulas

Las fórmulas usadas para el cálculo de la elevación de la pluma son las desarrolladas por Gary A. Briggs aplicadas a las plumas dominadas por la flotabilidad. Se considera que la temperatura del contaminante emitido es mayor que la encontrada en el aire ambiental.

La fórmula es:

$$\Delta_h = \frac{1.6F^{1/3}x^{1/3}}{\hat{u}} \quad (4.1)$$

Donde:

Δ_h = Elevación de la pluma

F = Flujo de flotabilidad

\hat{u} = Velocidad promedio del viento

x = Distancia a sotavento de la chimenea/fuente

g = Aceleración debido a la gravedad

V = Tasa volumétrica del flujo del gas

T_s = Temperatura del gas de la chimenea

T_a = Temperatura del aire ambiental

$$F = \frac{g}{\pi} V \left(\frac{T_s - T_a}{T_s} \right) \quad (4.2)$$

Estas fórmulas sirven para determinar la línea central de la pluma, lugar en el que se producen las mayores concentraciones de contaminantes.

4.7. Tipos de modelos de dispersión del aire

Existen muchos tipos diferentes de modelos de dispersión, desde modelos de pluma Gaussiana basados en clases de estabilidad atmosférica hasta modelos computacionales basados en dinámica de fluidos. Existen algunos factores que influyen el comportamiento de una pluma de contaminantes, tales como la velocidad del viento, la estabilidad atmosférica, la presencia de inversión térmica, la temperatura de la pluma, la velocidad de salida de la pluma, el terreno, los obstáculos cercanos a la fuente de contaminación, etc. A excepción de los dos últimos factores, todos estos efectos son incorporados en el modelo de dispersión más básico, el modelo de pluma Gaussiano. Este modelo no incluye ninguna forma de aleatoriedad que no sea una densidad de probabilidad estadística definida para la fluctuación de la velocidad del viento, obteniendo perfiles de concentración promedio. Llamados también modelos *determinísticos*. Debido a la simplicidad de este modelo, es muy común emplear estos modelos para calcular rápidamente el impacto de una fuente de contaminación del aire previamente identificada.

Por otro lado, existen modelos *estocásticos* más complejos que están basados en procesos de “aleatoriedad” aparente, por lo que son llamados *pseudoaleatorios*. En los modelos estocásticos de partículas Lagrangiano, la emisión del contaminante es descrita por definición como un número largo de partículas contaminantes, cada una representa una pequeña parte del contaminante. Cada partícula sigue una trayectoria aleatoria alrededor de la velocidad media del viento. Siguiendo un número importante de estas partículas, es posible predecir las concentraciones a sotavento del contaminante.

Básicamente consisten en un grupo de ecuaciones matemáticas que sirven para interpretar y predecir las concentraciones de contaminantes causadas por la dispersión y por el impacto de las plumas. Existen cuatro tipos genéricos de modelos: gaussiano, numérico, estadístico y físico.

- a) Los modelos gaussianos son ampliamente usados para estimar el impacto de contaminantes no reactivos.
- b) Los modelos numéricos son más apropiados para contaminantes reactivos, pero requieren información extremadamente detallada sobre la fuente y los contaminantes.
- c) Los modelos estadísticos se emplean cuando la información científica sobre los procesos químicos y físicos de una fuente están incompletos o son vagos.
- d) Los modelos físicos requieren de estudiar modelos del fluido o en túneles aerodinámicos del viento. Estos modelos son muy complejos y requieren asesoría técnica de expertos. Sin embargo, en el caso de áreas con terrenos complejos y condiciones de flujo también complejas, flujos descendentes de la chimenea, y los edificios altos, puede ser la mejor opción.

La selección depende del tipo de contaminantes emitidos, de la complejidad de la fuente y del tipo de topografía que rodea la instalación. Algunos contaminantes se forman a partir de la combinación

de contaminantes precursores. Algunos contaminantes reaccionan fácilmente una vez que son emitidos a la atmósfera. Estas reacciones reducen las concentraciones y puede ser necesario considerarlas en el modelo. La complejidad de la fuente también desempeña un papel en la selección. En la dispersión de las plumas y los contaminantes, la topología es un factor importante que debe ser considerado al seleccionar un modelo. Las plumas elevadas pueden tener un impacto en áreas de terrenos altos. En el caso que existan terrenos elevados, se debe usar un modelo que considere esto.

Modelos gaussianos

La ecuación de distribución gaussiana es la más usada, emplea cálculos relativamente simples que solo requieren dos parámetros de dispersión para identificar la variación de las concentraciones de contaminantes en el nivel del suelo sobre la base de las variables atmosféricas de tiempo promedio, por lo que no es posible obtener un “cuadro” instantáneo de las concentraciones de la pluma. Sin embargo, cuando se emplean promedios de tiempo de 10 minutos a una hora para estimar las variables atmosféricas de tiempo promedio necesarias en la ecuación, se puede asumir que las concentraciones de contaminantes en la pluma están distribuidas normalmente.

$$c = \frac{Q}{2\pi\sigma_y\sigma_z u} e^{-1/2\left(\frac{y}{\sigma_y}\right)^2} \left\{ e^{-1/2\left(\frac{z-H}{\sigma_z}\right)^2} + e^{-1/2\left(\frac{z+H}{\sigma_z}\right)^2} \right\} \quad (4.3)$$

Donde:

c = Concentración del contaminante en el nivel del suelo (g/m^3)

Q = Masa emitida por unidad de tiempo

σ_y = Desviación estándar de la concentración de contaminantes en dirección y (horizontal)

σ_z = Desviación estándar de la concentración de contaminantes en dirección z (vertical)

u = Velocidad del viento

y = Distancia en dirección horizontal

z = Distancia en dirección vertical

H = Altura efectiva de la chimenea

De la ecuación anterior se pueden hacer las siguientes observaciones:

- La concentración del contaminante es proporcional a la emisión del contaminante
- La concentración del contaminante es inversamente proporcional a la velocidad del viento:
Altas concentraciones de contaminante deben esperarse a velocidades del viento bajas.

Si la emisión y la velocidad del viento afecta al crecimiento de la pluma, los dos enunciados anteriores son sólo aproximaciones.

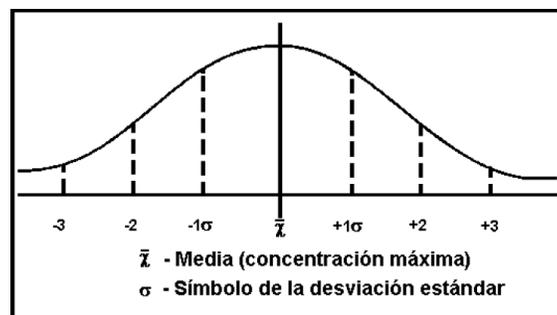


Figura 4. 29. Distribución gaussiana.

La desviación estándar determina el tamaño de la pluma a sotavento de la fuente. El tamaño depende de la estabilidad atmosférica y de su propia dispersión en dirección y y z . Los coeficientes de la dispersión σ_y y σ_z representan la desviación estándar de la normal en la curva de distribución gaussiana y son funciones de la velocidad del viento, de la cubierta de nubes y del calentamiento de la superficie por el sol.

a) Modelo de pluma gaussiana

Se debe dejar que el borde de la pluma se refleje desde el suelo sin perder ninguna contaminación, es decir, es necesario que el borde de la pluma se mantenga. La distribución

gaussiana y la elevación de la pluma dependen de que el suelo sea relativamente plano a lo largo del recorrido. La topografía afecta el flujo y la estabilidad atmosférica del viento.

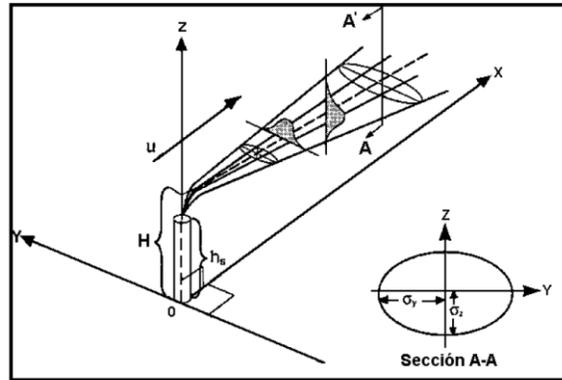


Figura 4. 30. Representación esquemática de la pluma gaussiana.

Para obtener el modelo de una pluma mediante la distribución gaussiana es necesario que:

- La dispersión de la pluma tenga una distribución normal
- La tasa de emisión (Q) sea constante y continua
- La velocidad y la dirección del viento sean uniformes
- La reflexión total de la pluma se produzca en la superficie
- La turbulencia atmosférica es constante en tiempo y espacio

La pluma resultante es de perfil de concentración gaussiana en dirección lateral y vertical y se desplegará a medida que la distancia a la fuente aumente, la concentración por hora promedio está muy cercana a la gaussiana en muchos casos, y tanto como se usen correlaciones empíricas bien establecidas para estimar los parámetros del modelo, los modelos de pluma Gaussiana pueden ser muy precisos.

Las correcciones son hechas para incorporar la velocidad del viento a la altura apropiada dentro del modelo, los cuales deben ser simples y eficientes. La desventaja que presenta es que son

menos precisos y generalmente menos aplicados que los modelos sofisticados. Su precisión tiende a disminuir rápidamente después de 10 a 20 Km.

Una convención para la ubicación de las plumas es la definición de los ejes coordenados en Modelos de Dispersión de Pluma Gaussiana, la cual se muestra a continuación

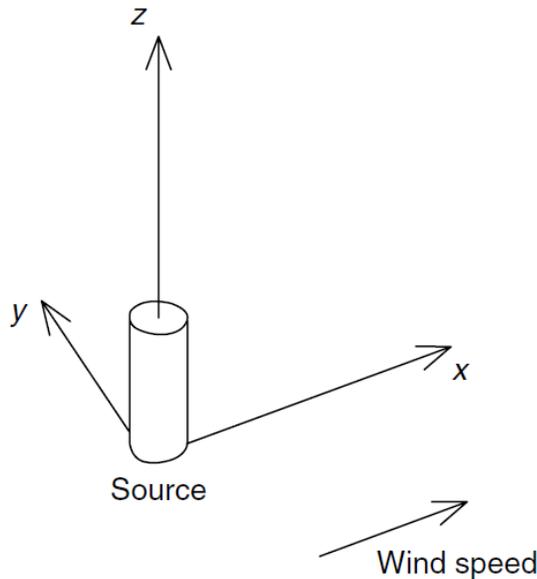


Figura 4. 31. Sistema coordenado en modelos de dispersión gaussianos simples.

En el modelo de calidad del aire Euleriano, se emplea otra convención:

- El eje x de oeste a este
- El eje y de sur a norte

El ángulo de la dirección del viento por sí mismo es objeto de una convención. Generalmente 0° está asociado con un viento norte (de norte a sur), 90° está asociado con un viento este, y así sucesivamente.

Ejemplos de modelos de este tipo son: SCREEN3, ISC3, AERMOD.

b) Modelos de Soplo Gaussiano

Fueron diseñados para solventar las debilidades más evidentes de los modelos anteriores. Se asume que una pila puede ser subdividida en una serie de soplos de contaminantes que tiene un perfil de contaminación gaussiano en todas direcciones. Cada soplo sigue la dirección y velocidad del viento local independientemente de los otros soplos. Así, si la dirección del viento cambia en espacio o tiempo, el soplo seguirá un patrón curvo. Se desempeñan bien para distancias superiores al menos de 50 Km y son rutinariamente usadas para distancias superiores a 200 Km. Computacionalmente son más intensos que los modelos de pluma.

Estos modelos se consideran dentro de los *modelos Lagrangianos*. Ejemplo de este modelo es CALPUFFS

c) Parámetros de dispersión para modelos gaussianos

Los parámetros de dispersión σ_y y σ_z se calculan según la clase de estabilidad de la atmósfera, para ello es necesario conocer algo sobre las condiciones climáticas del lugar de emisión. La clasificación más comúnmente empleada para la estabilidad atmosférica fue desarrollada por Pasquill y Cliford; ellos definieron seis clases, nombradas de la “A” a la “F”, siendo “A” la más inestable, “D” la atmósfera neutral y “F” la clase más estable (Tabla 4 - 5).

Tabla 4 - 5. Criterio de clases de estabilidad de Pasquill – Gifford.

$u \left(\frac{m}{s} \right)$	Día			Noche	
	Radiación solar incidente			Abundancia de nubes	
	Intenso	Moderado	Ligero	Nublado	Limpio
				$(\geq 4/8)$	$(\leq 3/8)$
< 2	A	A – B	B	E	F
2 – 3	A – B	B	C	E	F
3 – 5	B	B – C	C	D	E
5 – 6	C	C – D	D	D	D
> 6	C	D	D	D	D

La evaluación de la incidencia de radiación solar depende de la posición del sol sobre el horizonte, la clase de estabilidad depende de la latitud. La atmósfera es inestable en días soleados, neutral en días nublados y noches, y estable en noches despejadas. El aumento en la velocidad del viento provoca más condiciones neutrales.

En la formulación original del modelo de dispersión, los parámetros de dispersión eran leídos desde gráficas, muchas de ellas descritas empíricamente por ecuaciones, como el caso de Briggs, quien sugirió ecuaciones que reflejan la naturaleza autocorrelacionada estocástica del proceso de dispersión y quien propuso ecuaciones en función de la topografía (Tabla 4 - 6 y Tabla 4 - 7).

Tabla 4 - 6. Ecuaciones para los parámetros de dispersión en terreno rural (Parámetros Pasquill-Gifford).

Clase de estabilidad	σ_y (m)	σ_z (m)
A	$0.22x(1 + 0.0001x)^{-0.5}$	$0.2x$
B	$0.16x(1 + 0.0001x)^{-0.5}$	$0.12x$
C	$0.11x(1 + 0.0001x)^{-0.5}$	$0.08x(1 + 0.0002x)^{-0.5}$
D	$0.08x(1 + 0.0001x)^{-0.5}$	$0.06x(1 + 0.0015x)^{-0.5}$
E	$0.06x(1 + 0.0001x)^{-0.5}$	$0.03x(1 + 0.0003x)^{-1}$
F	$0.04x(1 + 0.0001x)^{-0.5}$	$0.016x(1 + 0.0003x)^{-1}$

Tabla 4 - 7. Ecuaciones para los parámetros de dispersión en terreno urbano (Parámetros McElroy-Pooler).

Clase de estabilidad	σ_y (m)	σ_z (m)
A – B	$0.32x(1 + 0.0004x)^{-0.5}$	$0.24x(1 + 0.0001)^{0.5}$
C	$0.22x(1 + 0.0004x)^{-0.5}$	$0.2x$
D	$0.16x(1 + 0.0004x)^{-0.5}$	$0.14x(1 + 0.0003x)^{-0.5}$
E – F	$0.11x(1 + 0.0004x)^{-0.5}$	$0.08x(1 + 0.0015x)^{-0.5}$

Las ecuaciones aplican hasta 10 kilómetros y se vuelven irreales a larga distancia. No son recomendables más allá de 30 kilómetros. La EPA las considera para promedios por hora.

Modelos Estocásticos Lagrangianos de Partículas

En estos modelos se asume que cada fuente emite un número largo de partículas, y cada partícula sigue un camino aleatorio alrededor del vector principal del viento, actualizando cada tiempo de paso. La predicción de concentración de contaminantes es obtenida contando el número de partículas en un volumen de aire determinado. Potencialmente siguen la física actual de dispersión

del aire mejor que cualquier otro modelo. Son muy precisos y pueden ser usados para largas distancias (miles de kilómetros). Computacionalmente son muy intensos porque es necesario considerar decenas de miles de millones de partículas para cada fuente.

La dispersión del aire es una versión turbulenta de la difusión molecular y en gran parte sigue las mismas matemáticas. Por lo anterior, el modelado estocástico de dispersión está basado en su mayoría en descripciones estocásticas de difusión molecular, la cual es la teoría de movimiento Browniano. Posteriormente, Langevin desarrolló una teoría fundamental mucho más simple que dicha teoría que incorpora la inercia de las partículas suspendidas. Así, la teoría estocástica moderna de partículas es un desarrollo posterior de estas ideas, considerando el movimiento browniano y el movimiento turbulento de partículas contaminantes estimados como movimientos turbulentos de las partículas.

En el modelado estocástico y considerando intervalos de tiempo suficientemente cortos, σ_x del movimiento Browniano se incrementa proporcionalmente con el tiempo, tal como las plumas. El tiempo de integración Lagrangiano para partículas en movimiento Browniano (τ) en aire estancado, queda definido como

$$\tau = \frac{m}{3\pi\mu d_p} \quad (4.4)$$

Para partículas típicas de 1 μm , τ está en el orden de 10^{-7} s.

Y así, σ_x queda definido como

$$\sigma_x = \sqrt{\frac{2kT}{3\pi\mu d_p} t - \frac{2kT\tau}{3\pi\mu d_p} \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right)} \quad (4.5)$$

La ecuación anterior, describe la dispersión de la pluma en una atmosfera turbulenta basada en un argumento estadístico.

a) Considerando la atmosfera homogénea

Si reemplazamos las propiedades moleculares con propiedades turbulentas, aunado a los métodos numéricos estocásticos para resolver ecuaciones en lugar de soluciones analíticas, considerando fluctuaciones de velocidad y la dirección de viento horizontal (dirección en y), podemos expresar la siguiente ecuación que describe el movimiento de las partículas:

$$\frac{dv'}{dt} = -\frac{v'}{T_{i,L}} + \frac{F_c}{m} \quad (4.6)$$

Donde $T_{i,L}$ representa los pasos de tiempo discretos empleados. Al obtener la solución de la ecuación diferencial anterior, se llega a la solución:

$$v'(t) = v'(0) \exp\left(-\frac{t}{T_{i,L}}\right) \quad (4.7)$$

Y al incorporar la perturbación integral, se obtiene la expresión final:

$$v'(t) = v'(0) \exp\left(-\frac{t}{T_{i,L}}\right) + n(t) \quad (4.8)$$

Donde $T_{i,L}$ corresponde al tiempo integral lagrangiano para partículas individuales y $n(t)$ representa la función estocástica. Así, para realizar la simulación Lagrangiana se calcula de forma recursiva con un intervalo de tiempo Δt , usando una variable aleatoria normalmente distribuida con promedio cero y desviación estándar definida.

Aplicando las reglas de promedio, y asumiendo que $n(t)$ no está relacionada con $v'(t)$ y cuando la turbulencia es en estado estable, se puede aplicar la siguiente relación:

$$\overline{v'^2(t)} = R_L^2(t)\overline{v'^2(0)} + \overline{n^2(t)} \quad (4.9)$$

Donde $R_L(t) = \exp\left(-\frac{t}{T_{i,L}}\right)$

Y definiendo varianzas se tiene:

$$\sigma_n = \sqrt{1 - R_L^2(t)}\sigma_v \quad (4.10)$$

Analizando el comportamiento limitado para incrementos pequeños de tiempo

$$\sigma_n = \sqrt{1 - \exp\left(-\frac{2t}{T_{i,L}}\right)}\sigma_v \quad (4.11)$$

Y así se tiene

$$v'(t) = v'(0) \exp\left(-\frac{t}{T_{i,L}}\right) + \sqrt{1 - \exp\left(-\frac{2t}{T_{i,L}}\right)}\sigma_v r(t) \quad (4.12)$$

Por lo que $n(t)$ puede ser proporcional a la raíz cuadrada del incremento de tiempo. Además, $n(t)$ es proporcional a la función estocástica conocida como *proceso Wiener*, $W(t)$:

$$n(t) = \sqrt{\frac{2t}{T_{i,L}}}\sigma_v W(t) \quad (4.13)$$

Donde $W(t)$ es la función estocástica continua con densidad de probabilidad normal (Gaussiana) con media 0 y desviación estándar $t^{1/2}$

Si la ecuación (4.14) es calculada recursivamente con un paso de tiempo Δt , usando una variable aleatoria normalmente distribuida con promedio cero y desviación estándar dada por la ecuación

(4.13), la ubicación actual de la partícula puede ser calculada con el método de Euler considerando la turbulencia homogénea:

$$y'(t + \Delta t) = y'(t) + v'(t)\Delta t \quad (4.14)$$

Si bien, el método de Euler no es una herramienta numérica tan precisa, y adicionalmente Stohl (1988) enlistó algoritmos más sofisticados, su uso en este estudio es un complemento a la medición y estimación de concentraciones de metano entérico, pues se busca encontrar, como aproximación inicial, las posibles trayectorias de las partículas.

4.8. Perfiles de concentración

Una vez establecidas las trayectorias aleatorias de las partículas modeladas, es necesario determinar la posible concentración a partir de dichas ubicaciones. Para ello, existen diversos métodos para determinar la concentración de partículas en un área o volumen determinado, como por ejemplo *particle-in-cell* y *particle-wall*, y más recientemente el uso de *estimaciones no paramétricas de funciones de densidad* que ofrecen mayor exactitud, como el método *kernel*.

Particle-in-cell

La forma más sencilla de obtener la concentración de un contaminante en una ubicación determinada es empleando el método *particle-in-cell*. En este método, el dominio es dividido en celdas cúbicas con tamaño h (m) y el número de partículas en cada celda, n , es contada. La concentración en la celda es estimada de la siguiente forma

$$c = \frac{mn}{h^3} \quad (4.15)$$

Donde m es la masa del contaminante representada por una partícula. Cuando solo se consideran una o dos dimensiones, la potencia de h debe ser cambiada a 1 o 2, y m debe definirse

adecuadamente para asegurar consistencia en las unidades. El inconveniente de este método es que fuerza a que cada celda tenga una concentración homogénea, y esto obliga a que no exista suavidad en las fluctuaciones estadísticas.

Método kernel

El *método Kernel* (Lorimer, 1986; Lorimer and Ross, 1986) establece que cada particular contribuye a la estimación de la concentración, pero con un peso que decrece rápidamente considerando la distancia de la partícula al punto de interés. De forma general, se establece que la concentración es calculada como:

$$c = \frac{m}{h^3} \sum_{i=1}^n k\left(\frac{d_i}{h}\right) \quad (4.16)$$

Donde m es la masa del contaminante (gr), n es el número de partículas en el dominio, h es la resolución o ancho de banda (m), d_i es la distancia entre la partícula i y el punto de interés, y k es la función *kernel*. La distribución gaussiana es generalmente empleada como la función *kernel*:

$$k(x) = \pi^{-n_d/2} \exp(-x^2) \quad (4.17)$$

Donde n_d es el número de dimensiones consideradas en la estimación de la concentración. En nuestro caso, esta es la función kernel que se implementará para determinar la concentración del metano en las posibles trayectorias de las partículas de la concentración medida por la WSN.

- Selección del ancho de banda “h”

Uno de los problemas encontrados al emplear el método *kernel*, es determinar un valor aceptable para el ancho de banda (“h”) en cada punto de interés para determinar la concentración. Durante los cálculos de la función, se apreció que cuando los valores de h son pequeños, la gráfica de

densidad presenta picos que tienden a infinito en los puntos que representan las posiciones de las partículas (pesos). Por otro lado, conforme aumenta el valor del ancho de banda, la gráfica se va suavizando en magnitud lo que provoca un aumento en el ancho de la función, dando como resultados una concentración muy elevada y una pérdida de la forma de la función. Para obtener un valor óptimo de h , se emplearon dos propuestas matemáticas: una conocida como la regla de oro de Silverman para anchos de banda en una dimensión y la regla de Scott para más de dos dimensiones.

La regla de oro de Silverman (Silverman's rule of thumb) establece que:

$$h = \left(\frac{4\sigma^5}{3n} \right)^{1/5} \quad (4.18)$$

Donde σ es la desviación estándar del conjunto de datos y n es el número de elementos. Cuando se trabaja con conjuntos de datos de más de una dimensión ($n_d > 1$), se emplea la regla de Scott (Scott's Rule) para calcular el ancho de banda, la cual establece:

$$\hat{H} = \frac{1}{n^{d+4}} \Sigma^{1/2} \quad (4.19)$$

Donde d corresponde al número de dimensiones sobre las que se realizará la determinación y Σ representa la matriz de covarianza.

Ejemplo de este modelo es el AUSTRAL2000

Modelos de Advección y Dispersión Euleriana

Estos modelos están basados en una malla que está fijada en el espacio. En cada punto de la malla la advección y la dispersión de contaminantes son calculados con base en gradientes de concentración local. La dispersión es calculada con una versión turbulenta de la Ley de Fick (de

difusión) que establece que el flujo de difusión es proporcional al gradiente de concentración. Son precisos a larga distancia, con baja resolución, tal vez celdas de 10 kilómetros de tamaño.

Son computacionalmente intensos y el potencial computacional necesario se incrementa muy rápidamente con el incremento de resolución. La gran ventaja es capaz de manejar química compleja, no así modelos de dispersión simple.

Ejemplo de estos modelos es CMAQ

Dinámica de Fluidos Computacional (CFD)

CFD es la práctica de solución de ecuaciones de Navier-Stokes en un mallado fijo con el fin de calcular explícitamente el movimiento turbulento de masas de aire. Estas ecuaciones son balance de momentums. Se complementa con modelos Eulerianos o Lagrangianos para calcular la dispersión de la pluma. Es una técnica computacional exhaustiva y es usualmente factible solo a escalas pequeñas.

CAPÍTULO 5:
DESARROLLO DEL PROYECTO

5.1. Introducción

El presente proyecto fue desarrollado en el estable “La esperanza”, ubicado a 4.3 kilómetros a la salida de Ciudad Juárez, Durango, rumbo a la carretera federal Durango-Torreón, municipio de Lerdo, Durango. Ubicado en las coordenadas 25°29'24.5"N 103°37'43.0", con una extensión de 2 ha, de las cuales 1.2 ha están dedicadas a la ganadería lechera, el resto corresponde a la infraestructura de oficinas, bioreactor y planta de productos lácteos. Debido al giro de la empresa, únicamente se cuenta con ganado de raza Holstein en diversas etapas de desarrollo. La población está formada por 348 vacas en diversas etapas, teniendo animales en lactancia, vaquillas prepubertas y preñadas, vacas maduras y vacas secas. Para tener una mejor distribución del proyecto, se realizó la segmentación de la población vacuna en las siguientes categorías y características: vaquillas prepubertas, animales con un peso menor a 200 kg, y vaquillas preñadas, con un peso entre 200 y 400 kg. Vaquillas maduras, de 400 a 600 Kg; y vacas lecheras de alta producción. Finalmente, vacas de baja producción y vacas secas, con un peso promedio de 500 Kg. En la siguiente tabla se puede apreciar la clasificación anteriormente mencionada y su relación con la producción de leche diaria.

Tabla 5 - 1. Distribución del ganado y su producción láctea diaria.

Categoría	Producción de leche (litros por día)
Vaquillas prepubertas	0
Vaquillas preñadas	0
Vaquillas maduras	18
Vacas lecheras de alta producción	21
Vacas de baja producción	12
Vacas secas	12

La dieta alimenticia está programada para suministrarse dos veces al día, a las 06 horas y a las 18 horas y en libertad de alimento disponible. La composición del alimento se basa en una dieta

concentrada de granos de maíz, vitaminas y minerales, y forraje (alfalfa). Los complementos nutricionales quedaron reservados como información confidencial en cantidades y composición. Para cada categoría se proporciona una dieta concentrada como se muestra en la Tabla 5 - 2. El agua se encontraba *ad libitum* para los animales en bebederos alrededor de cada una de las zonas de reposo y del área de ordeña.

Tabla 5 - 2. Descripción de la dieta alimentaria según su categoría.

Categoría	Granos (ensilaje de maíz y sorgo)	Complementos nutricionales (vitaminas y minerales)	Forraje (alfalfa de alta y baja calidad)
Vaquillas prepubertas Vaquillas preñadas	65%	15%	25%
Vaquillas maduras Vacas lecheras de alta producción	45%	15%	40%
Vacas de baja producción	70%	10%	20%

En la Figura 5. 1 se identifican las tres zonas en las que se tiene separado al ganado debido a sus características similares tanto de nivel de desarrollo como de producción de leche. Las vacas se encuentran separadas en tres zonas. En la zona 1 se encuentran las 46 vacas más jóvenes; en la zona 2, que es la más extensa, cuenta con 216 vacas maduras y en la zona 3 se encuentran 18 vacas secas y 68 vacas de baja producción.

La población promedio anualizada con base en la relación de nacimientos/fallecimientos es de 606 cabezas, con un crecimiento poblacional anual de 195 crías aproximadamente (76% de vacas preñadas anualmente), y en promedio 6 muertes (equivalente al 1.7%). El rango de peso del ganado va desde los 250 kg presentes en las vaquillas hasta 610 kg aproximadamente, teniendo como peso maduro 620 kg. La producción de leche promedio es cercana a los 21 litros de leche en las vacas

lecheras con un contenido graso aproximado de 7%. La temperatura promedio anualizada es de 24.5°C y la velocidad promedio del viento entre 1 y 3 m/s.

Es importante mencionar que la información previa es la base para el desarrollo del método de estimación según las guías del IPCC tanto para nivel 1 como para nivel 2. Así mismo, sirve como referencia para el desarrollo de la etapa de monitoreo a través de la WSN, específicamente, para la ubicación de los nodos sensores.



Figura 5. 1. Mapa del establo con identificación de zonas de rumiantes.

5.2. Mediciones de metano entérico a través de la red inalámbrica de sensores (WSN)

A través del análisis de comportamiento que tiene el ganado lechero, se determinaron las ubicaciones en las que más concentración de ganado hay durante el transcurso del día. Estos puntos

de interés fueron los lugares en los que se instalaron los nodos sensores de la red inalámbrica que monitorearon las emisiones producidas. En la Figura 5. 2 se puede apreciar, a manera de punto color verde fino, la ubicación considerada para la instalación de los nodos de la red inalámbrica, logrando cubrir las tres áreas en las que se encontraba el ganado.



Figura 5. 2. Ubicación de los nodos alrededor de las zonas de interés.

La WSN estaba formada por tres nodos esclavos y un nodo maestro, cuya finalidad fue capturar concentraciones de metano y acumularlas durante intervalos de 10 minutos. Una vez transcurrido ese tiempo, el dato era transmitido al nodo maestro, quien enviaba el paquete de datos al equipo de cómputo conectado por puerto USB. El dato era separado y la concentración convertida a una lectura de partes por millón (ppm), posteriormente convertido a $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y finalmente almacenados los datos en una hoja de Excel a manera de base de datos.

Los nodos fueron instalados a una altura promedio de un metro sobre el nivel del suelo, ya que a esta altura se encontraron lecturas de forma más frecuente, contrario a la altura óptima de 2 metros para mediciones, pues las lecturas eran escasas. Se realizaron tres series de pruebas en tres alturas diferentes. En la Figura 5. 3 se muestran los valores promediados correspondientes a las tres series en un solo punto de interés con alturas variables considerando una ventana de tiempo de 10 minutos. El color azul refiere a la medición a 2 metros de altura sobre el nivel del suelo, el color naranja corresponde a una altura de 1.5 metros y finalmente, el color gris corresponde a 1 metro.

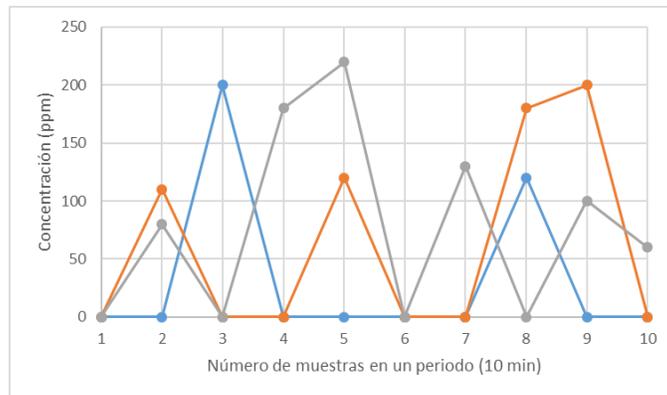


Figura 5. 3. Concentraciones detectadas a diferentes alturas del nodo sensor.

La arquitectura de la WSN está diseñada en tres bloques, representados en la Figura 5. 4. Por lo siguiente: Módulo de detección y conversión de metano, módulo de empaquetamiento y transmisión de la información y el módulo de alimentación de la red.

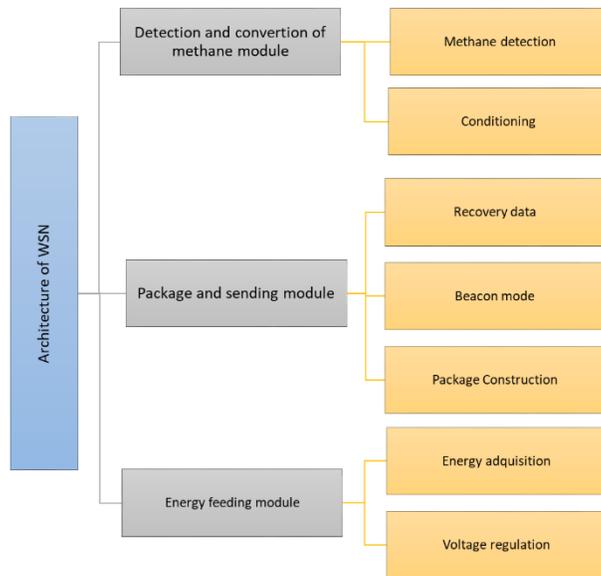


Figura 5. 4. Arquitectura del sistema de detección de metano.

El módulo de detección y conversión de metano detecta las emisiones de metano generadas por el ganado o bien, producidas por el estiércol depositado en la superficie. Su configuración de *wake-up mode* le permite activar el microcontrolador en el momento de detectar el gas. Así, se tendrán lecturas frecuentes y con ahorro de energía. Una vez realizada la lectura, el dato es convertido, procesado y almacenado. El módulo de empaquetamiento y transmisión de la información accede al registro de la lectura efectuada y recupera el dato. El paquete a transmitir contiene la siguiente información: Clave de acceso a la red, identificador del nodo, lectura efectuada (mV), fecha y hora. La configuración *SimpleLink Long-Range* de la WSN nos permite transmitir a largas distancias sin pérdidas de potencia o señal. La gestión de red en *beacon mode* permite al nodo coordinador establecer comunicación inicial con nodos sensores nuevos en la red para permitir la transmisión de datos de una forma organizada, eficiente y simple. Y por otro lado permite a los nodos sensores incorporarse a la red a través de los parámetros de configuración enviados por el nodo coordinador. Finalmente, el módulo de alimentación de energía convierte y regula los niveles de voltaje y monitoreo de corriente. La red de paneles solares instalada en las techumbres de los establos, tiene

una capacidad de 40 kilowatts, sin embargo, solo se provee 1 kilowatt de energía eléctrica al área de establos, de la cual se alimenta la WSN.

Configuración de la red

La red estuvo formada por las tarjetas SimpleLink Ultra-Low Power CC1310 Sub-1 GHz mostrada en la Figura 5. 5



Figura 5. 5. Tarjeta LaunchPad CC1310 de Texas Instruments.

En la Tabla 5 - 3 se presentan algunas de las características que posee este dispositivo y que fueron empleadas para el desarrollo de este proyecto:

Tabla 5 - 3. Algunas de las características de la tarjeta CC1310.

- 64 KB Flash programable interna	- Módulo de radio frecuencia sub-1 GHz
- Controlador de sensores de ultra-baja potencia con arquitectura de 16 bits	- M-Bus inalámbrico y PHY IEEE 802.15.4g
- Pines periféricos que pueden ser configurados como cualquier tipo de entrada/salida de propósito general	- ADC 12-bits, 8 canales, 200 kmuestras/s
	- Protocolos de comunicación: UART, SPI, etc.
	- Sensor de temperatura integrado

Como se puede apreciar en el diagrama de bloques de la tarjeta CC1310, Figura 5. 6, el módulo de comunicación inalámbrica de baja potencia tiene su procesador ARM Cortex-M0 independiente del procesador principal, brindándole independencia, bajo consumo de potencia y flexibilidad. Así

mismo, los sensores pueden ser controlados a muy baja potencia por su dedicado MCU autónomo que puede ser configurado para manejar sensores analógicos o digitales.

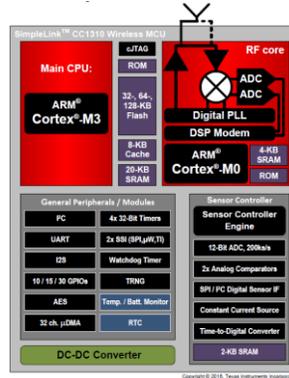


Figura 5. 6. Diagrama de bloques de la tarjeta CC1310 de Texas Instruments.

- Long Range Mode

El término Modo de Largo Alcance (LRM, por sus siglas en inglés) se utiliza para identificar la técnica de codificación de la capa física que intercambia la velocidad de datos por ganancias de sensibilidad. Estas ganancias se logran mediante codificación digital. El término "tasa de datos" se refiere a la tasa de información disponible para las capas superiores del protocolo. El término "tasa de símbolos" se refiere a la tasa actual de modulación "en el aire". El núcleo de modulación utilizado por LRM es en todos los casos FSK de 2 niveles. Sólo hay dos valores símbolos FSK disponibles: +1 y -1. Por lo tanto, cada símbolo FSK (G) solo puede indicar un bit.

Así mismo, existen dos modos de operación de LRM: Legacy LRM y SimpleLink Long Range Mode, este último es el único modo de operación para esta tarjeta.

El Modo 2 se ha desarrollado para solucionar los inconvenientes del Modo 1 cuando se trata de desplazamiento de frecuencia sobre el rendimiento. Las diferencias entre el Modo

1 y el Modo 2 son la secuencia de sincronización inicial y la selección del núcleo de modulación predeterminado. El modo 2 usa GFSK con $h = 0.5$. El ajuste mínimo recomendado es 10 ksps con una desviación de 2,5 kHz. La configuración predeterminada recomendada es 20 ksps, 5 kHz de desviación y un DSSS = 2 (que proporciona 5 kbps tasa de datos efectiva).

- TI 15.4-Stack

TI 15.4-Stack es una plataforma de software completa para el desarrollo de aplicaciones que requieren soluciones de redes inalámbricas basadas en topología en estrella de muy bajo consumo, largo alcance, confiables, sólidas y seguras. Dentro de esta plataforma, existen tres modos diferentes de configuración de red: *Frequency hopping mode*, *beacon enable mode* y *Non-beacon mode*. Para este proyecto se empleó la configuración *beacon enable mode*.

La especificación IEEE 802.15.4 define la capa física (PHY) y de acceso al medio (MAC) del modelo de interconexión de sistemas abiertos (OSI) de operación de una red. La capa PHY define las condiciones de enlace inalámbrico como modulación, frecuencia, y potencia, mientras que la capa MAC define el formato de los datos. Esta misma especificación define el modo de operación habilitado para beacons (*beacon enable mode*) donde el dispositivo coordinador de la red de área personal (PAN), nodo maestro, transmite *beacons* (pequeños paquetes) periódicamente para indicar su presencia y permite que otros dispositivos se incorporen y se sincronicen con la red. Los paquetes proporcionan información relacionada con las balizas y también marcan el inicio del nuevo *superframe*. La baliza tiene información sobre las especificaciones del “supermarco”, que ayuda al dispositivo que tiene la intención de unirse a la red para sincronizar el tiempo y los

parámetros relacionados con la red antes de iniciar el proceso de unión. La baliza ayuda al dispositivo existente en la *PAN* a mantener la sincronización de la red. El supermarco, o supertrama, se divide en un período activo y otro inactivo. Durante el período activo, los dispositivos se comunican mediante el procedimiento CSMA / CA. El período inactivo permite a los dispositivos de la red conservar energía.

Para la configuración de la red se emplearon dos softwares de Texas Instruments: SmartRF Studio y Code Composer Studio. El software SmartRF Studio es una herramienta muy versátil que se puede usar para evaluar fácilmente la radio en una etapa temprana del proceso de diseño y configurar dispositivos de RF de baja potencia. Es especialmente útil para la generación de valores de registro de configuración y comandos, para que finalmente se descargue la configuración a la tarjeta CC1310. Por otro lado, Code Composer Studio es el paquete sobre el cual se programan las instrucciones, mayormente compatibles con C++, para configurar otros parámetros de la red, otros dispositivos como el controlador de sensores, manejo de memoria, etc.

La configuración de los parámetros empleados para la comunicación inalámbrica fueron los siguientes:

- a) Frecuencia de operación: 868 MHz (Rango de operación: 779-930 MHz)
- b) Filtro Rx: 49 MHz
- c) Potencia Tx: 14 dBm (Máxima potencia)
- d) PHY Mode: SimpleLink Longe Range @ 5 kbps
- e) Canal de comunicación: 10

Previo a la implementación de la red en el proyecto de monitoreo de metano entérico, se realizaron pruebas de distancia vs RSSI y distancia vs Received-OK para determinar el alcance de

comunicación óptimo y máximo para la instalación de los nodos sensores. En la Figura 5. 7 se muestra el área donde se realizaron las pruebas de conectividad.

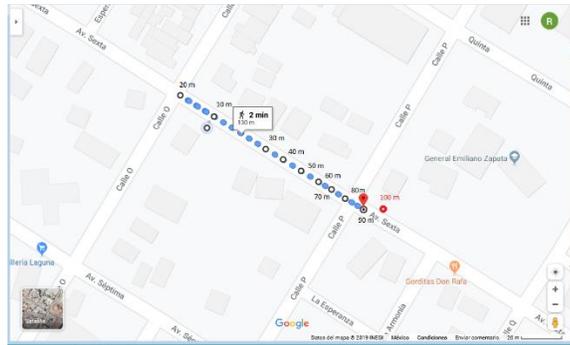


Figura 5. 7. Escenario de prueba de conectividad.

Para esta prueba se tomó como referencia el envío de veinte paquetes para determinar la estabilidad de transmisión y la recepción de los paquetes conforme aumentaba la distancia al nodo receptor, en la Tabla 5 - 4 se pueden observar los resultados obtenidos de las pruebas.

Tabla 5 - 4. Resultados obtenidos de la prueba de distancia vs RSSI y distancia vs recepción de paquetes OK.

Distancia (m)	RSSI prom (dBm)	Received-OK (paquetes)
1 m	-30.9	20
5 m	-45	20
10 m	-71.8	20
20 m	- 81.7	20
30 m	-83.5	20
40 m	-94	20
50 m	-95.3	20
60 m	-96.7	20
70 m	-97.1	20
80 m	-92.3	20
100 m	-102	1

La gráfica de RSSI vs distancia (m) durante el desarrollo de la prueba se muestra en la Figura 5. 8, en donde se puede apreciar que hay poca pérdida de potencia en el rango de operación de 20 a 80 metros, garantizando la conectividad y la transmisión de paquetes de forma exitosa.

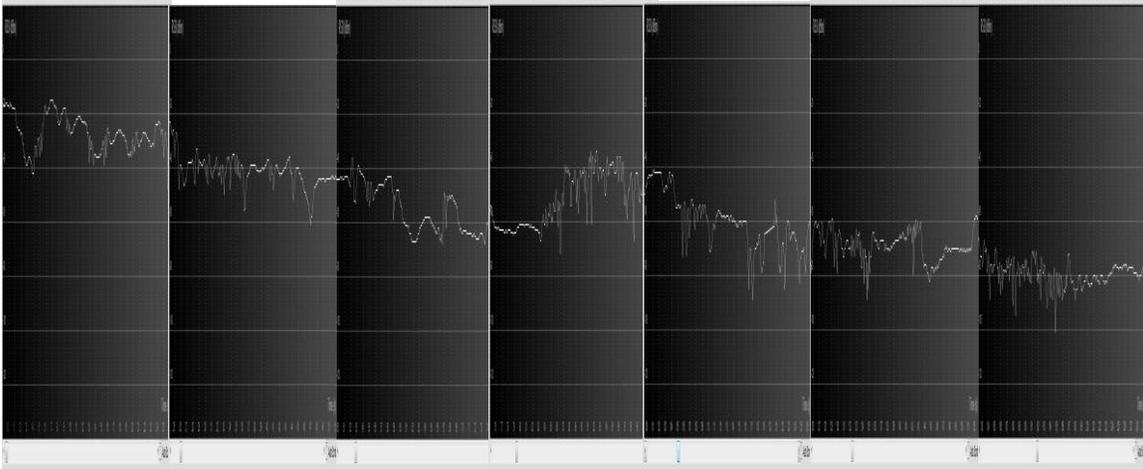


Figura 5. 8. Evolución de RSSI al aumentar la distancia de transmisión.

Configuración del sensor

- Medidor de metano

Adicional al sensor de metano empleado, que en la siguiente sección se describe, se empleó un medidor de gas metano *Sensit HXG-2d* que tiene un sensor exclusivo de metano de estado sólido de baja potencia con precisión del 10%, autocalibración y tiempo de espera de 60 segundos. Escala de medición de 10 a 990 ppm. La **¡Error!** **No se encuentra el origen de la referencia.** es del medidor de metano empleado.



Figura 5. 9. Medidor de metano Sensit HXG-2d.

- Sensor de metano

Para la detección de metano entérico se empleó el sensor MQ-4 de estado sólido con rango de detección de 100 a 10,000 ppm. Alimentación de 5V para el circuito y para el circuito calefactor, disipación de potencia menor a 950 mW, salida analógica de 2.5 a 4 V,

acoplamiento de señal de salida a través de un amplificador inversor y requiere tiempo de calentamiento previo de 48 horas. En la Figura 5. 10 se muestra el sensor de metano.



Figura 5. 10. Sensor de metano MQ-4.

En la Figura 5. 11, se muestra el esquema del circuito acondicionador que viene incorporado con el sensor.

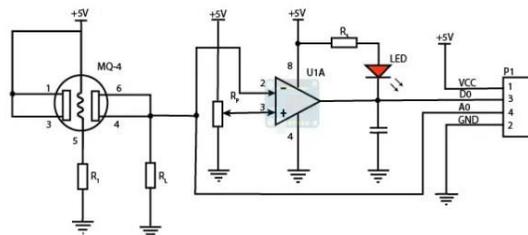


Figura 5. 11. Diagrama del circuito acondicionador del sensor MQ-4.

a) Curva característica genérica

El valor de resistencia del MQ-4 es diferente a varios tipos de gases y concentraciones de gases. En la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se muestra la curva de sensibilidad del MQ-4 considerando una resistencia de carga (R_L) igual a $20\text{ K}\Omega$.

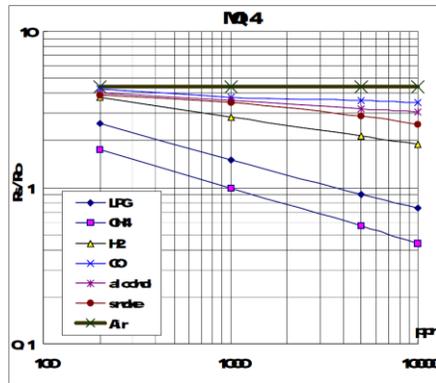


Figura 5. 12. Curva de sensibilidad del sensor MQ-4.

Analizando la hoja de características del sensor se puede ver que $\sim 20K\Omega \geq R_S \geq 5K\Omega$, considerando el valor de $R_{O(ideal)} = 10K\Omega$. Esto implica que cuando $R_S \sim 20K\Omega$ significa que no existe CH_4 en la muestra de aire y cuando $R_S \sim 5K\Omega$ significa que existe una saturación de la concentración de 10,000 ppm de CH_4 . Entonces se puede estimar que para que se cumpla en la curva característica $\frac{R_S}{R_O} = 1$, entonces $R_{O(ideal)} = R_S = 10K\Omega$, en el punto en el cual la concentración son 1,000 ppm.

Si se consideran los puntos de la curva característica y de forma general el comportamiento del sensor es de la forma $y = a \cdot x^b$, donde “y” representa la relación $\frac{R_S}{R_O}$ y “x” la concentración en ppm, empleando el método de mínimos cuadrados a través de Excel, se obtienen los valores de los coeficientes a y b .

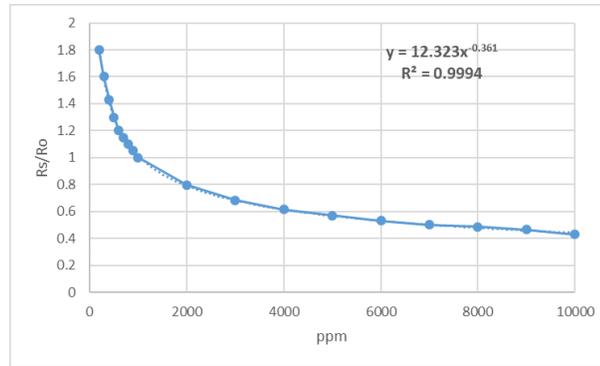


Figura 5. 13. Curva característica y su ecuación (ideales).

Entonces, como se puede ver, la ecuación obtenida es

$$\frac{R_S}{R_O} = 12.323(ppm)^{-0.361} \quad (5.1)$$

Donde $a = 12.323$ y $b = -0.361$.

En cuanto al proyecto, se consideró el medidor de metano Sensit HXG-2d como patrón para medir las concentraciones y se emparejaron con los valores de voltaje que proporcionaba el sensor en la salida. Para ello, en un contenedor cerrado se introdujo por las partes laterales el medidor y el sensor de metano. Por la parte inferior se introdujo la muestra de gas metano. Se buscó que los dos sensores estuvieran lo más cercanos entre sí para que la medición fuera lo más correspondiente posible. La fuente de gas metano fue el gas contenido en los depósitos de encendedores. Al liberar la muestra de gas, se realizó un tiempo de espera aproximado de 3 minutos para la estabilidad de la lectura, una vez pasado el tiempo transitorio de mezcla. Se realizaron 2 series de 4 mediciones para dar un total de 8 mediciones. Cada medición estuvo formada por un promedio de 10 muestras. Entre cada serie se invirtió el depósito para liberar el gas, se lavó con jabón neutro, se secó con aire a presión y se dio un tiempo de reposo de 24 horas. Así, la tabla de mediciones que se obtuvo

al tomar muestras de CH₄ en un ambiente cerrado y relacionar la medición con el voltaje de salida, es:

Tabla 5 - 5. Relación entre el medidor de metano y el voltaje de salida del sensor.

Concentración (ppm)	V _{out} (mV)
80	2225
120	2405
170	2560
220	2675
290	2797
310	2826
420	2959

Al graficar la relación mostrada en la Tabla 5 - 5 en Excel (Figura 5. 14), la herramienta de “línea de tendencia” de la forma exponencial permite determinar la ecuación característica de los puntos encontrados, así como su coeficiente de determinación cercano a 1.

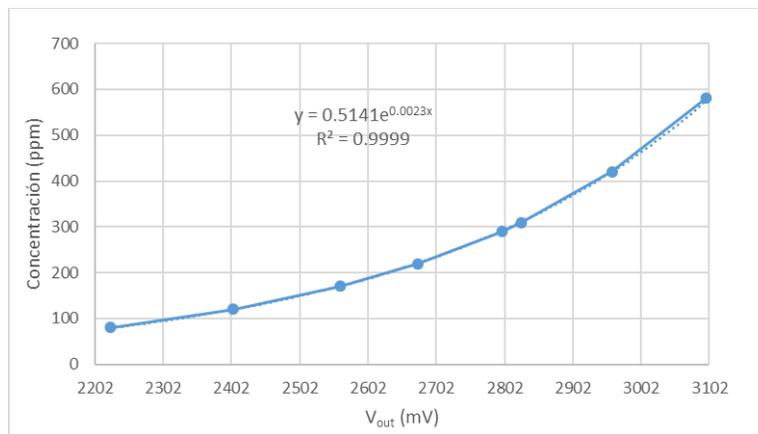


Figura 5. 14. Curva característica del sensor en función de V_{out}.

Así, la ecuación que describe la relación entre la concentración en ppm y los mV detectados en la salida del sensor de metano es:

$$ppm = 0.5141e^{0.0023(V_{out})} \quad (5.2)$$

Donde V_{out} está en mV.

b) Calibración y curva característica específica

Por otro lado, para validar la información anterior, inicialmente se realizó la calibración para obtener R_0 . Para ello, en el depósito donde se realizarían las pruebas mostradas en la Tabla 5 - 5, se desarrolló el proceso de calibración. El cual consistió en calentar por 48 horas el sensor para estabilizar la resistencia interna del sensor. Una vez transcurrido ese tiempo, se empezaron a tomar muestras del voltaje de salida del sensor que lo relaciona con el valor de R_s

$$R_s = \left(\frac{V_C}{V_{out}} - 1 \right) R_L \quad (5.3)$$

Donde V_C es el voltaje de alimentación del sensor (5 V) y V_{out} es el voltaje de salida del sensor. Para tener una mejor certeza sobre el valor de $R_{s(aire)}$ en ausencia de metano, se promediaron todas las muestras capturadas en un periodo de 5 minutos. Este proceso se hizo para los tres sensores. Al tener un valor estable de $R_{s(aire)}$, se procedió a obtener el valor de R_0 , el cuál es el valor de referencia sobre el que se desarrollará la curva característica. Para ello, se introdujo el gas metano en el recipiente hasta llegar a una concentración aproximada de 1,000 ppm, empleando el medidor de metano como referencia. Al alcanzar la concentración y dando un tiempo de asentamiento de la mezcla de aproximadamente 15 minutos, se empezaron a tomar medidas del voltaje de salida V_{out} para obtener los valores de R_s en la concentración de referencia de 1,000 ppm. Al igual que en el proceso inicial, se realizó el promedio de los primeros mil valores de R_s

encontrados, obteniendo así el valor de R_0 . En la siguiente tabla (Tabla 5 - 6) se puede apreciar el valor obtenido para los tres sensores.

Tabla 5 - 6. Valores de R_0 y $R_{s(aire)}$ obtenidos en la calibración.

	$R_{s(aire)}$ ($K\Omega$)	R_0 ($K\Omega$) @ 1,000 ppm
Sensor 1	17.979	10.1198
Sensor 2	18.198	10.1792
Sensor 3	17.289	9.6704
Ideal	~20	10

Con este valor se realizaron las pruebas para obtener la curva característica de cada uno de los sensores de metano. Introduciendo seis concentraciones de metano definidas (con el medidor de metano) y promediadas como en el proceso de calibración y posteriormente se graficaron en Excel para emplear la herramienta de línea de tendencia con una regresión potencial. Los puntos y las curvas para cada uno de los sensores se muestran en la Figura 5. 15.

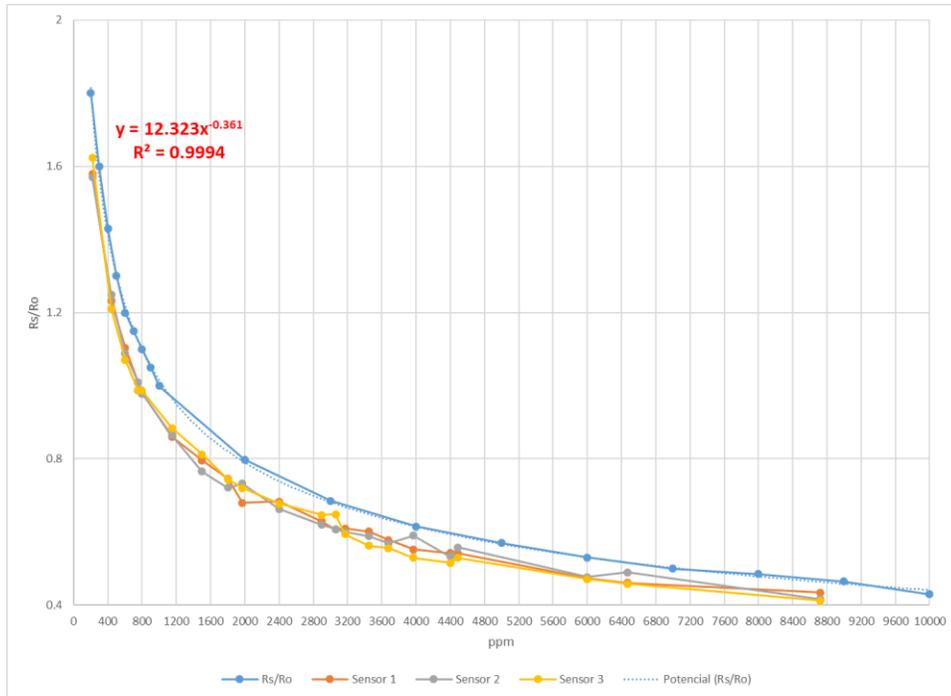


Figura 5. 15. Curvas características de sensores.

Las ecuaciones de las curvas características encontradas para cada uno de los sensores fueron las siguientes:

- Para el sensor 1: $\frac{R_S}{R_O} = 10.715(ppm)^{-0.356}$, con $R^2 = 0.9973$ (5.4)

- Para el sensor 2: $\frac{R_S}{R_O} = 10.463(ppm)^{-0.353}$, con $R^2 = 0.9957$ (5.5)

- Para el sensor 3: $\frac{R_S}{R_O} = 11.566(ppm)^{-0.367}$, con $R^2 = 0.9941$ (5.6)

Mediciones de campo

Debido a la escasa cantidad de nodos disponibles para el desarrollo de una red más estructurada, los tres nodos sensores se rotaron en las tres zonas, con una duración de dos semanas en cada lugar.

La **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** muestra con círculos rojos, verdes y amarillos, los puntos en los que se instalaron los nodos sensores en cada una de las zonas de interés.

El nodo maestro (círculo azul) se instaló en la bodega debido a la necesidad de estar conectado a

una PC para almacenar en una hoja de Excel los datos recibidos provenientes de los nodos sensores.



Figura 5. 16. Posiciones en las que se instalaron los nodos sensores para cada zona.

El proceso de calibración se desarrolló en una semana, en la cual se realizaron ajustes y limpieza a los nodos sensores debido a que las vacas ensuciaban los nodos con saliva por lo que se saturaban las mediciones. Para solucionar esto se optó por alejar en distancia los nodos. Una vez ajustados y calibrados los sensores se realizaron los registros de las mediciones durante el periodo de tres meses de forma continua, cada zona fue monitoreada un mes. Una vez por semana fueron validadas las lecturas de sensores en forma aleatoria con el medidor de metano. Al realizar las comparativas entre las lecturas del medidor y las realizadas por los sensores, se estimó un error máximo en la medición de hasta $\pm 10\%$.

La Figura 5. 17 muestra el comparativo entre las detecciones realizadas por el nodo sensor y las lecturas efectuadas por el medidor en el mismo lugar e instante de tiempo t . Las barras de color

morado representan las mediciones obtenidas por el nodo sensor y las barras de color rosa indican las lecturas del medidor de metano. Las marcas horizontales superior e inferior en cada muestra indican el límite superior e inferior del rango de 10% de tolerancia en la medición, seleccionado como aceptable.

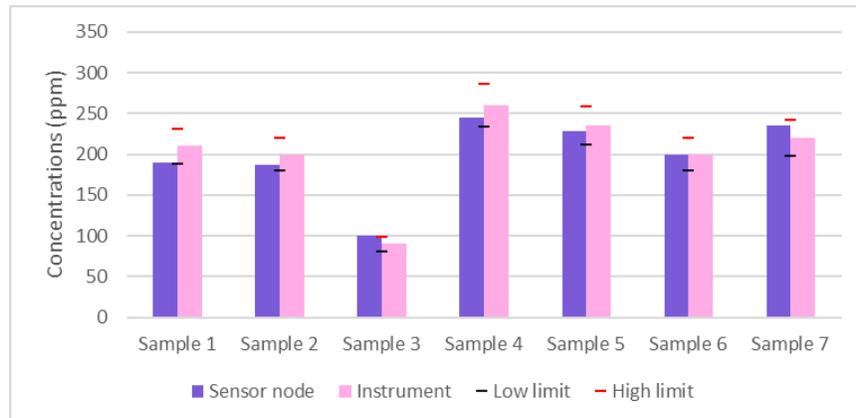


Figura 5. 17. Comparativo de mediciones entre el nodo sensor y el medidor de metano.

- Mediciones previas

Antes de iniciar con las mediciones empleando la WSN se hicieron lecturas empleando el medidor de metano para contar con un antecedente de los posibles valores a detectar y confirmar que las ubicaciones seleccionadas fueran de los puntos con mayor presencia de metano entérico.

La Figura 5. 18 muestra los valores de las mediciones realizadas alrededor de las zonas de interés empleando el medidor de metano durante un mes.

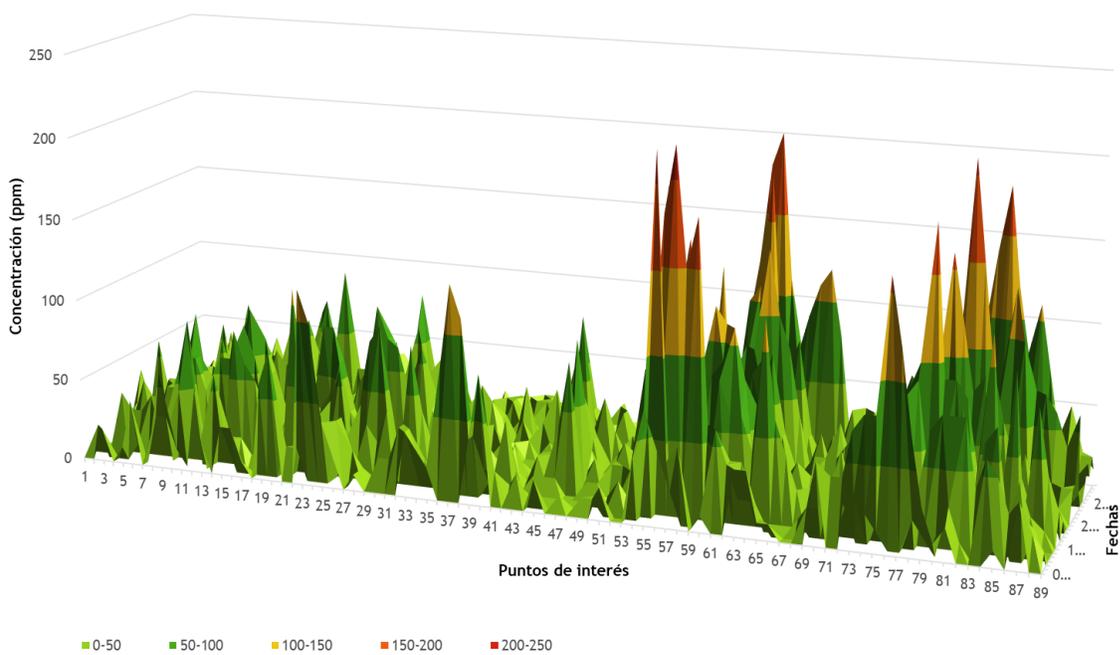


Figura 5. 18. Concentraciones detectadas empleando el medidor de metano.

- Mediciones en la zona 1

Siguiendo el patrón de actividad de las vaquillas, se apreció que los animales se alimentan de forma constante por lo que las emisiones que se detectaron fueron relativamente continuas. En esta situación, se recalibraron los sensores para poder medir niveles bajos de metano, aproximadamente 20 ppm, ya que estas lecturas se encontraban de forma constante generadas por el estiércol depositado en el suelo. La Figura 5. 19 muestra el periodo de 24 horas de monitoreo del nodo sensor 0x04 localizado en la zona 1. Los puntos indican el promedio de las muestras (en ppm) detectadas en lapsos de 10 minutos.

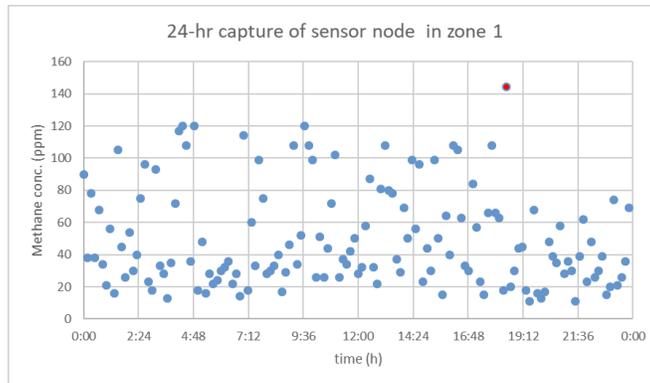


Figura 5. 19. Mediciones promedio del sensor 0x04 en la zona 1.

Las mediciones acumuladas durante todo el día por el nodo sensor 0x03 localizado en el punto más frecuente de la zona 1 se aprecian en la Figura 5. 20, teniendo como promedio una concentración de 1.50 gr/h. La línea roja representa el promedio de las mediciones. Los puntos en la gráfica indican la concentración acumulada en periodos de 10 minutos. En ciertas horas del día se apreció una disminución en la concentración detectada con respecto a las horas anteriores, esto concuerda con los periodos de ordeña en los cuales los animales son retirados de forma escalonada de su zona para ser llevados al área de ordeña y baño.

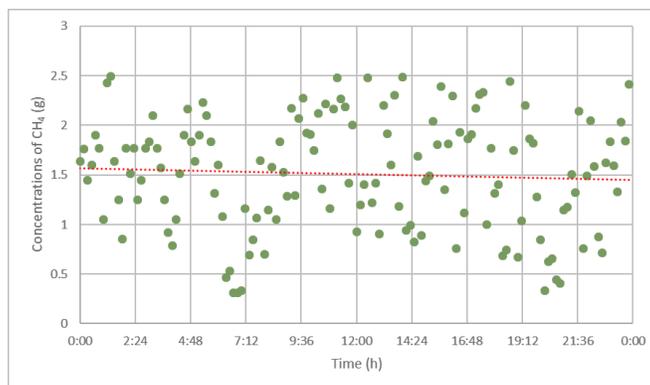


Figura 5. 20. Mediciones del sensor 0x03 en la zona 1.

- Mediciones en la zona 2

La distribución de los nodos fue sobre el perímetro exterior y a un metro de distancia, al igual que la zona 1. En la Figura 5. 16 los círculos de color rojo son los nodos instalados en esta zona. La concentración detectada en promedio fue de 18 gr/hr de metano. Figura 5. 21 representa las concentraciones acumuladas que se detectaron por el nodo 0x03 durante una ventana de 24 horas. Teniendo de forma ocasional picos de más de 35 gr de metano. Los periodos de tiempo establecidos para las concentraciones fueron de 10 minutos.

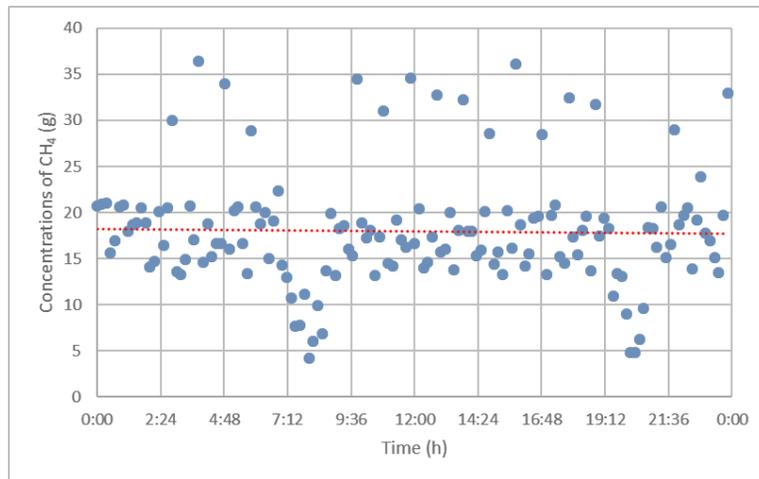


Figura 5. 21. Mediciones del sensor 0x06 en la zona 2.

En la Figura 5. 22 se muestran las concentraciones encontradas por el nodo 0x03 en un periodo de 24 horas dentro de la misma zona 2. En este caso, el promedio de concentraciones es de 105 gr/hr.

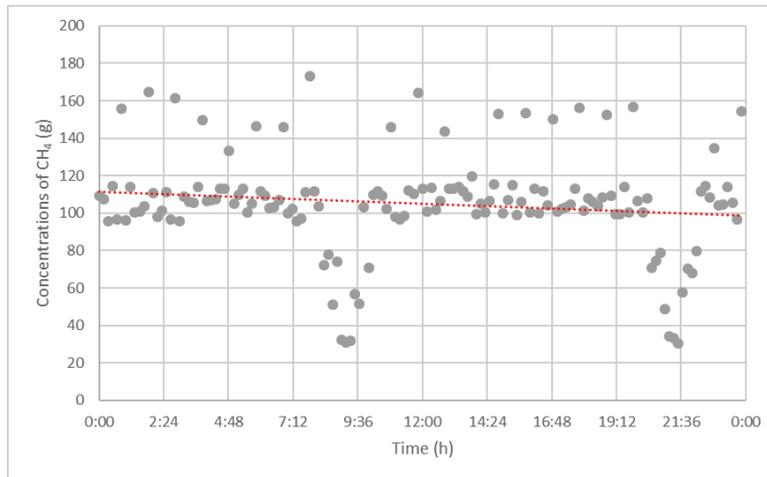


Figura 5. 22. Mediciones del sensor 0x03 en la zona 2.

- Mediciones en la zona 3

En este sector el promedio encontrado fue de 17 gr/hr para el nodo sensor 0x04. La distribución de concentraciones en el nodo en un periodo de 24 horas se aprecia en la Figura 5. 23.

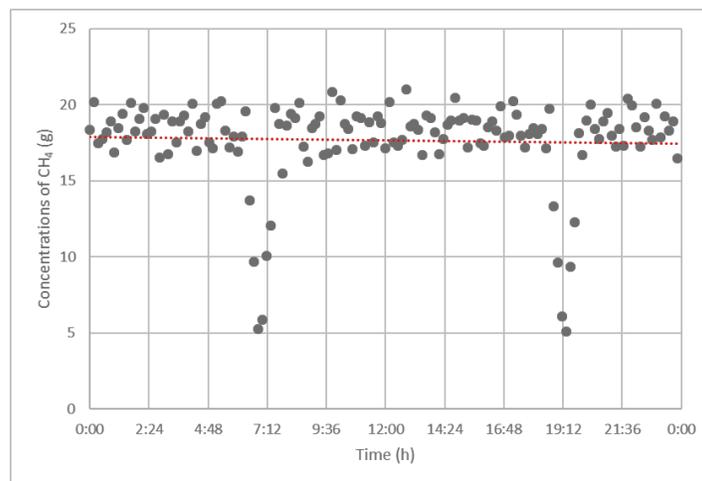


Figura 5. 23. Mediciones del sensor 0x03 en la zona 3.

Otra muestra de las concentraciones encontradas es la Figura 5. 24, con una concentración promedio de 22 gr/hr para el nodo sensor 0x06. Al igual que en los casos anteriores, se

aprecia un periodo de tiempo en donde decaen las concentraciones debido al proceso de ordeña.

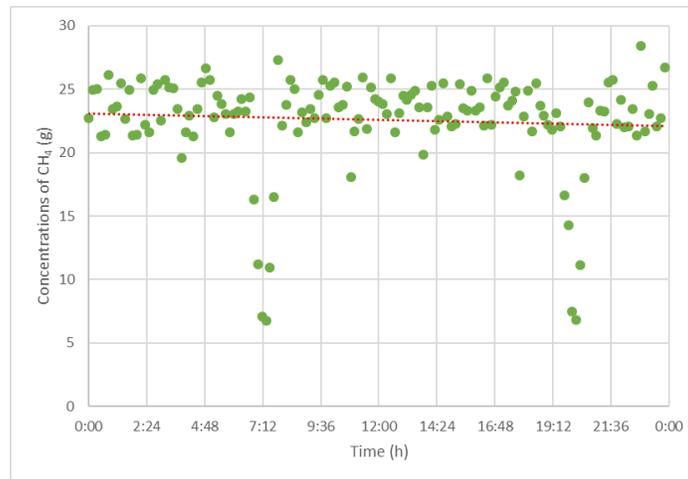


Figura 5. 24. Mediciones del sensor 0x06 en la zona 3.

5.3. Estimaciones de generación de metano

Empleando el procedimiento descrito en el capítulo 3 para la estimación de metano entérico, como producto de la digestión y por manejo de estiércol en su modalidad de nivel 1 y nivel 2, al aplicarlo en el caso de estudio y considerando las características mencionadas del ganado se desarrollaron los cálculos en Excel para determinar cada uno de los parámetros relacionados con las estimaciones.

Emisiones de metano de nivel 1

En este nivel de estimación, el ganado se clasificó en tres grupos: hembras maduras, vacas lecheras y en ganado vacuno en crecimiento, pues se buscan características generales para segmentar el ganado, a diferencia de una estimación de nivel 2 que buscaría más segmentación. Muchos parámetros son referidos como constantes de acuerdo a características particulares ya sea del ganado, del alimento o del ambiente en el cual se pretende determinar la emisión. Así pues, de

acuerdo a las ecuaciones previas, las características del ganado y los parámetros predefinidos, se encontraron los siguientes datos:

Población promedio anual. - 149 hembras maduras, 411 vacas lecheras y 46 cabezas de ganado en crecimiento para un total poblacional estimado de 606 cabezas. Considerando una temperatura media invernal de 11.08°C, situación alimentaria de pastura con dieta concentrada, digestibilidad de alimentos (DE%) entre el 60% y 75%, los valores obtenidos para los requerimientos de energía se muestran en la Tabla 5 - 7.

Tabla 5 - 7. Determinación de los requerimientos de energía según la clasificación de ganado, nivel 1.

10.2 POBLACIÓN DE GANADO Y CARACTERIZACIÓN DE LOS ALIMENTOS										
Cantidad	Categoría	Energía Neta para mtto (NE _m)	Energía Neta para actividad (NE _a)	Energía Neta para crecimiento (NE _g)	Energía Neta para lactancia (NE _l)	Energía Neta para preñez (NE _p)	Estimación de Nep	REM	REG	Energía Bruta (GE) - MJ/día
86	Hembras maduras	3043.114	517.329464	0	4.9434	304.31145	244.156861	917.592667	900.864667	6.91945413
216	Vacas lecheras	8594.78803	1461.11397	0	34.454	859.478803	775.918364	879.098833	850.076333	16.4809294
46	Ganado vacuno en crecimiento	972.854986	165.385348	1.6263E-169	0	97.2854986	0	904.202731	883.287615	1.93666632

Con los datos previamente mencionados y obtenidos, así como considerando los factores de emisión definidos para la región de América Latina, las emisiones totales por fermentación entérica para cada categoría de ganado calculadas, se muestran en la Tabla 5 - 8.

Tabla 5 - 8. Estimaciones de CH₄ por fermentación entérica, nivel 1.

Categoría de ganado	Emisiones por fermentación entérica (Gg CH ₄ /año)
Vacas lecheras de alta producción	0.026136
Hembras maduras	0.006536
Ganado vacuno en crecimiento	0.00253
Emisiones totales	0.035202

Por otro lado, para la gestión del estiércol se consideran las actividades relacionadas con el manejo del mismo, en este caso, se emplean sistemas de base líquida y la temperatura promedio anual, de los cuales se determinan constantes de sólidos volátiles y con este a su vez calcular los factores de emisión correspondientes. La Tabla 5 - 9 muestra los valores de las emisiones encontradas por gestión del estiércol.

Tabla 5 - 9. Estimaciones de CH₄ por gestión del estiércol, nivel 1.

Categoría de ganado	Emisiones por gestión del estiércol (Gg CH₄/año)
Vacas lecheras de alta producción	0.020628
Hembras maduras	0.000172
Ganado vacuno en crecimiento	0.000092
Emisiones totales	0.020892

Emisiones de metano de nivel 2

El método de estudio de nivel 2 es más complejo, ya que considera además de los datos anteriormente mencionados, se calcula la ingesta de energía bruta, el gasto de energía que tiene el animal y factores de conversión para cada categoría. En este método, la población se ha segmentado más específicamente, así tenemos clasificada de la siguiente manera la población: vacas secas, vacas de baja producción, vacas lecheras de alta producción, vaquillas maduras, vaquillas preñadas y vaquillas prepubertas. Al igual que las estimaciones por digestión, las emisiones por manejo del estiércol requieren más información detallada, tal como la cantidad de VS con base en la ingesta alimentaria y la digestibilidad, y la cantidad máxima de metano que puede producir ese estiércol (Bo) a partir del sistema implementado para su gestión.

Los valores de requerimiento energético para la población vacuna cambian en el método de nivel 2 en comparación con los valores encontrados en el nivel 1, pues ahora muchos parámetros son

calculados de acuerdo al tipo de alimento suministrado y las condiciones en las que se encuentra el ganado, tal como la digestibilidad de alimentos, el factor de conversión, etc. Por lo que los nuevos requerimientos energéticos encontrados se presentan en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..**

Tabla 5 - 10. Determinación de los requerimientos de energía según la clasificación de ganado, nivel 2.

Cantidad	Subcategoría	Energía Neta para mtto (NE _m)	Energía Neta para actividad (NE _a)	Energía Neta para crecimiento (NE _g)	Energía Neta para lactancia (NE _l)	Energía Neta para preñez (NE _p)	Estimación de Nep	REM	REG	Energía Bruta (GE) - MJ/día
18	<i>vacas secas</i>	612.852	104.184905	0	4.86651	61.2852384	0	931.539682	919.087	1.4090139
68	<i>vacas de baja producción</i>	2315.22012	393.58742	0	6.19374	231.522012	0	904.202731	883.287615	4.61945635
143	<i>vacas lecheras de alta producción</i>	5874.99756	998.749585	0	6.19374	587.499756	32858.9024	879.098833	850.076333	60.2720905
73	<i>vaquillas maduras</i>	3099.14355	526.854403	0	5.16145	309.914355	2751.02057	879.098833	850.076333	9.67988237
24	<i>vaquillas preñadas</i>	731.22697	124.308585	0	4.86651	73.122697	1316.20855	891.371143	866.357714	3.48838276
22	<i>vaquillas prepubertas</i>	609.700077	103.649013	0	0	60.9700077	0	917.592667	900.864667	1.29568946

Con dicha información, se determinan los factores de emisión de CH₄ para cada categoría en la que se clasificó el ganado y finalmente, al multiplicar dichos factores por cada una de las cabezas de las categorías, tenemos las emisiones totales por fermentación entérica del ganado: 4.16 Mg CH₄/año, las cuales se encuentran representadas en la Tabla 5 - 11.

Tabla 5 - 11. Estimaciones de CH₄ por fermentación entérica, nivel 2

Categoría de ganado	Factores de emisión de CH ₄ (Kg CH ₄ / cabeza - año)	Emisiones de CH ₄ (Gg CH ₄ /año)
Vacas lecheras de alta producción	25.69	0.003674458
Vaquillas maduras	4.12	0.000301255
Vaquillas preñadas	1.48	3.56925E-05
Vaquillas prepubertas	0.55	1.21525E-05
Vacas de baja producción	1.96	0.000133919
Vacas secas	0.60	1.08126E-05
Emisiones totales	34.43	0.004168289

Respecto a las emisiones derivadas por la gestión del estiércol, en este nivel de estimación, los factores de emisión están basados en la ingesta de energía bruta (GE) y el factor de conversión de metano correspondiente para cada categoría en la que se clasificó el ganado. En este cálculo se determinan previamente valores como la energía urinaria como fracción de la energía bruta (GE), la cantidad máxima de CH₄ (B_0) y el factor de conversión debido al sistema de gestión de camas profundas además del digester anaeróbico. En la Tabla 5 - 12 se muestran los valores de las emisiones encontradas por el manejo de estiércol.

Tabla 5 - 12. Estimaciones de CH₄ por gestión del estiércol, nivel 2.

Categoría de ganado	Emisiones de CH₄ por categoría (Kg CH₄/año)
Vacas lecheras de alta producción	29421.86
Vaquillas maduras	2412.18
Vaquillas preñadas	2150.03
Vaquillas prepubertas	947.34
Vacas de baja producción	9253.25
Vacas secas	938.67
Emisiones totales (Gg CH₄/año)	0.04512

5.4. Modelos de dispersión aplicados a las mediciones

En esta etapa del proyecto el objetivo fue generar una gráfica de dispersión y distribución simple aproximada de la concentración de metano con base en las condiciones climáticas obtenidas de la estación meteorológica. La concentración proveniente de la fuente de emisión contaminante que alimentó a los modelos de dispersión y de concentración, se obtuvo de los datos capturados por la red inalámbrica de sensores instalada en las tres zonas del establo. Se optó por implementar un modelo de dispersión simple estocástico lagrangiano para la trayectoria y considerando la función

de estimación de densidad de kernel clásica para determinar la concentración presente en cada punto de la trayectoria. Como complemento a este modelo de dispersión, se empleó la estimación de densidad de Kernel (KDE) para determinar las concentraciones en cada uno de los puntos de interés. El modelado se aplicó a la trayectoria de las partículas a sotavento con incrementos de pasos definidos en la longitud de la trayectoria e incrementos de tiempo acordes a la adquisición de muestras en el campo. Para desarrollar el modelo fue necesario contar con parámetros ambientales como velocidad, dirección del viento, temperatura, humedad relativa, etc., valores obtenidos por la estación meteorológica inalámbrica Vantage Pro2.

Para la etapa del modelado de las trayectorias de acuerdo al modelo estocástico, así como el cálculo de la concentración estimada de acuerdo a la posición de las partículas, se empleó Matlab. Es importante mencionar que el cálculo intensivo necesario para esta simulación, la cantidad de información, el número de partículas, el cálculo para las trayectorias aleatorias en cada incremento de distancia, etc, requiere software matemático especializado. Así, programas como Mathematica, Matlab u otro software con recursos orientados al manejo y solución de ecuaciones permiten obtener resultados en tiempos relativamente razonables. Previamente se analizó el uso de un lenguaje de programación, como C#, para programar los modelos y sus gráficas de dispersión, con el objetivo de no depender de una licencia como el caso de Matlab o mathematica. Sin embargo, al ejecutar el modelo de dispersión para obtener las posiciones, y posteriormente las concentraciones, la carga computacional fue tan alta que el programa presentaba lags y no respondía. Al incorporar la parte de graficación no solo el programa sino también el equipo, dejaron de responder. Por lo que esa opción se descartó, confirmando el uso de Matlab como software para el desarrollo del modelo y de las gráficas de dispersión.

Datos meteorológicos

Como complemento de información necesaria para el desarrollo de los modelos de dispersión y de concentración, son necesarios datos básicos del ambiente, tales como velocidad del viento, dirección del viento, temperatura ambiental, presión atmosférica y sus derivados como la desviación estándar de la velocidad del viento, de la concentración, etc. Para la adquisición de esos datos se empleó la estación meteorológica inalámbrica marca *Vantage Pro2*, instalada en el Tecnológico de la Laguna en el área de Posgrado, los cuales fueron almacenados en un servidor y posteriormente exportados a Excel para su uso. La Tabla 5 - 13 es un ejemplo de los datos obtenidos por la estación meteorológica.

Tabla 5 - 13. Datos parciales obtenidos de la estación meteorológica Vantage Pro2.

Date	Time	Temp Out	Out Hum	Wind Speed	Wind Dir	Rain Bar	Heat UV
6/15/2020	12:00 a	18.7	47	2.7	SSE	1013.8	0
6/15/2020	12:10 a	18.6	47	2.7	S	1013.8	0
6/15/2020	12:20 a	18.7	47	3.1	SSE	1013.4	0
6/15/2020	12:30 a	18.5	47	2.2	SSE	1012.9	0
6/15/2020	12:40 a	18.5	47	2.7	SSE	1012.7	0
6/15/2020	12:50 a	18.7	47	2.7	SSE	1012.5	0
6/15/2020	1:00 a	18.8	46	4.5	S	1012.7	0
6/15/2020	1:10 a	18.8	46	3.6	SSE	1012.7	0
6/15/2020	1:20 a	18.8	46	3.6	SSE	1012.8	0
6/15/2020	1:30 a	18.9	46	3.1	SSE	1012.8	0
6/15/2020	1:40 a	18.9	46	2.7	S	1012.5	0
6/15/2020	1:50 a	18.9	45	3.6	SSE	1012.4	0
6/15/2020	2:00 a	19	46	3.1	SSE	1012.2	0
6/15/2020	2:10 a	18.9	46	3.6	SSE	1012.1	0
6/15/2020	2:20 a	18.9	46	4.5	S	1011.9	0
6/15/2020	2:30 a	18.9	47	4	S	1011.3	0
6/15/2020	2:40 a	18.8	48	3.6	S	1011.6	0
6/15/2020	2:50 a	18.6	49	3.6	SSE	1011.3	0
6/15/2020	3:00 a	18.4	50	3.6	S	1011.3	0
6/15/2020	3:10 a	18.3	51	3.6	S	1011	0
6/15/2020	3:20 a	18	52	3.6	S	1011.3	0

Esta información se combinó con las concentraciones de metano entérico provenientes de la red inalámbrica de sensores para desarrollar el modelo. A manera de ejemplo, se presentan datos filtrados, ya que la estación tiene la capacidad de obtener más mediciones, tales como sensación

térmica, dirección o velocidad del viento más alta registrada en un periodo, índice de calor, índice THW, etc.

Desarrollo del modelo en Excel

En una primera etapa de esta sección, los modelos se desarrollaron en Excel para validar las ecuaciones propuestas y los datos obtenidos, posteriormente se desarrollaron en Matlab.

En un primer inicio, se propuso el desarrollo de un modelo de dispersión gaussiano pues se consideraba a la fuente de emisión (el ganado vacuno y sus heces) como una fuente puntual. En la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** y Figura 5. 26 se observa el modelo gaussiano desarrollado en Excel, la Figura 5. 25 indica la concentración del metano de acuerdo a su altura. Los parámetros considerados fueron: distancia de la fuente al punto de interés: 200 m (a sotavento), velocidad del viento: 5.65 m/s, estabilidad atmosférica tipo A, $\sigma_1 = 43.57$ y $\sigma_2 = 40$ con una fuente de emisión de 12 gr/s.

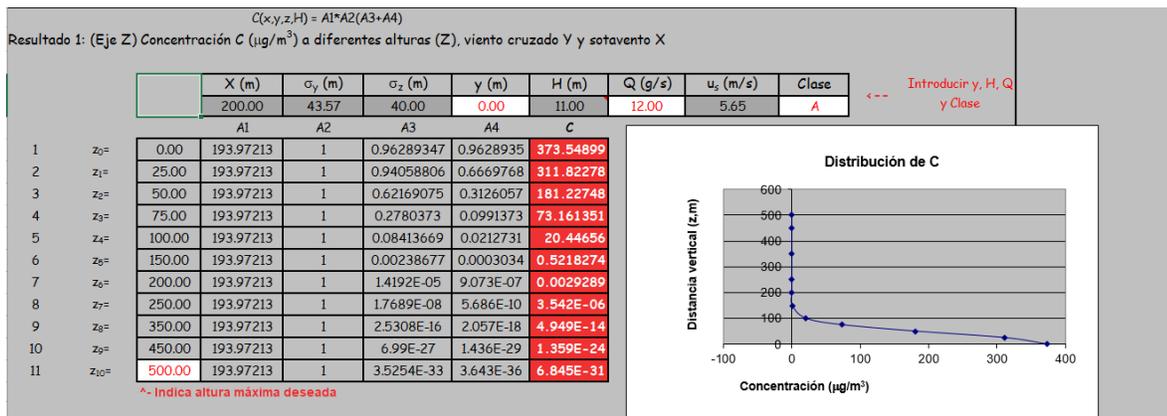


Figura 5. 25. Concentración de metano entérico de acuerdo a la altura de mezcla.

En la Figura 5. 26 se puede observar la distribución de la concentración sobre el eje Y, a una distancia de 200 mts del punto de emisión a sotavento.

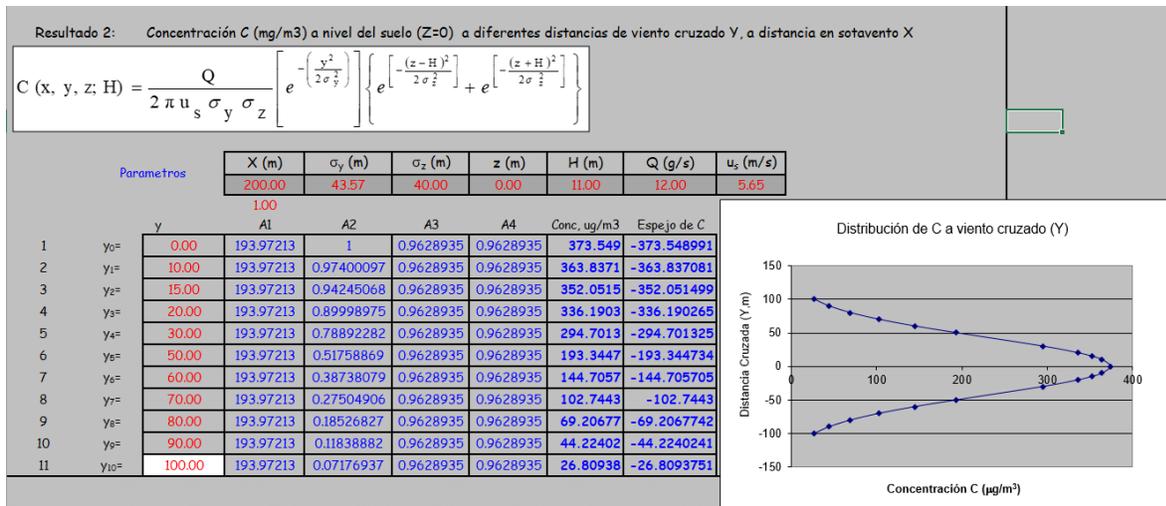


Figura 5. 26. Concentración de metano a 200 mts de la fuente de emisión, a sotavento.

Sin embargo, durante el desarrollo del modelo y posteriormente con la obtención de las concentraciones de metano entérico, se determinó que no era adecuado este modelo para las características de la fuente de emisión, por lo que se procedió a desarrollar el modelo estocástico lagrangiano de acuerdo a lo mencionado en el capítulo 4. Debido a la complejidad del modelo y las limitaciones de Excel, solo se simularon 10 partículas para validar la aleatoriedad y posteriormente desarrollar el modelo en Matlab.

En la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se muestra un ejemplo del desarrollo del modelo estocástico para una partícula que recorre una distancia a sotavento de 100 metros. Las columnas en color verde indican los resultados de las fórmulas implementadas. La columna $y'(m)$ corresponde a la posición de la partícula sobre el eje y, correspondiente al eje de viento cruzado, en una posición $x(m)$ recorrida a sotavento.

dt	Rn	Pn	pn	Nn	t(s)	x(m)	v'(m/s)	V'	y'(m)	Y'	v'prom
0	235236978	235236978	0.10954075	-1.99412391	0	0	0.39882478	0.398825	0	0	0.398825
10	110495119	110495119	0.0514533	0.66812203	10	20	0.41776315	0.417763	4.08293965	4.08294	0.408293965
20	1665594025	1665594025	0.77560266	-0.67244497	20	40	0.32074806	0.320748	7.77549571	7.7755	0.369255605
30	1189439530	1189439530	0.55387594	-0.23674378	30	60	0.27006577	0.270066	10.7295649	10.72956	0.295406917
40	-15089213	2132394434	0.99297354	0.09873925	40	80	0.25277341	0.252773	13.3437608	13.34376	0.261419589
50	1946151102	1946151102	0.90624723	-0.06597794	50	100	0.22310072	0.223101	15.7231314	15.72313	0.237937062
60	638143857	638143857	0.29715889	-0.91145861	60	120	0.12425785	0.124258	17.4599242	17.45992	0.173679286
70	750471481	750471481	0.34946552	1.26341593	70	140	0.22001486	0.220015	19.1812878	19.18129	0.172136355
80	1002722336	1002722336	0.46692897	-0.5584578	80	160	0.15152418	0.151524	21.038983	21.03898	0.185769519
90	1450123143	1450123143	0.67526621	-1.10058218	90	180	0.04338858	0.043389	22.0135468	22.01355	0.09745638
100	427754598	427754598	0.19918876	0.17395768	100	200	0.05407236	0.054072	22.5008515	22.50085	0.048730468

Figura 5. 27. Datos del modelo estocástico para una partícula que recorre 200 m.

El conjunto de posiciones sería la trayectoria que desarrollaría la partícula ejemplo, por lo que si quisiéramos modelar el movimiento aleatorio de n -partículas, esta tabla debe repetirse n veces. En este caso, se muestran incrementos a sotavento de 20 metros hasta 200 metros, sin embargo, los incrementos como la posición final de la partícula pueden reducirse o ampliarse. En la Figura 5. 28 se puede apreciar la trayectoria aleatoria que seguiría una partícula recorriendo una distancia de 1000 metros con incrementos de 20 metros.

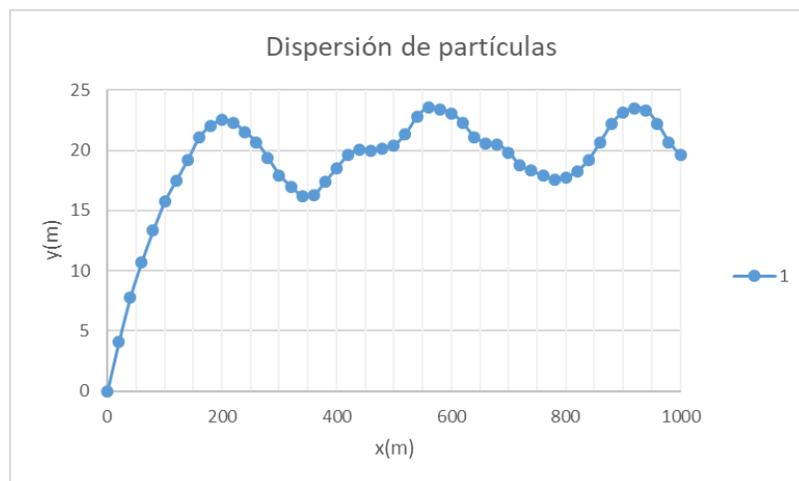


Figura 5. 28. Trayectoria aleatoria de una partícula en el modelo estocástico.

Si este proceso recursivo lo aplicamos a diez partículas, obtendríamos una gráfica similar a la mostrada en la Figura 5. 29, la cual representa la posición de cada una de las partículas. Si se incrementa el número de partículas, la sobrecarga de cálculos en Excel empieza a provocar lentitud en los cálculos y posteriormente en las gráficas. Además, se requeriría una hoja para cada partícula,

por lo que, si se desea simular la dispersión de un gas representado por miles de partículas, se requerirían miles de hojas de Excel.

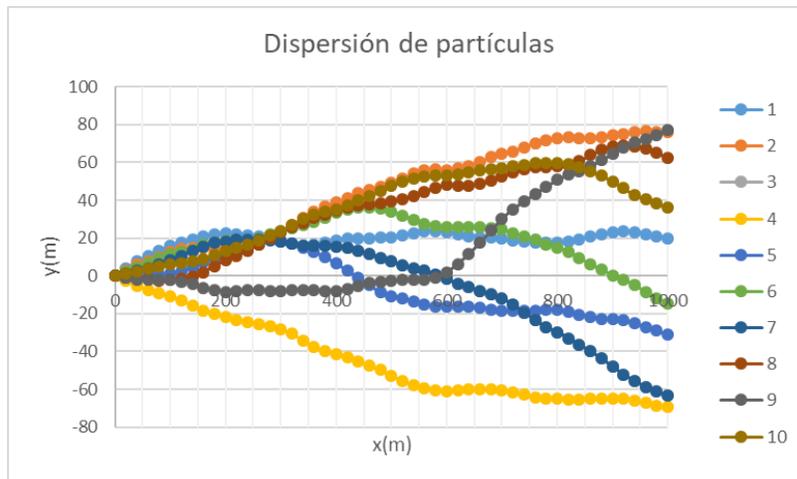


Figura 5. 29. Recorrido de posiciones generado por diez partículas con trayectoria a sotavento con una distancia de 1000 m.

Una vez obtenido el conjunto de posiciones aleatorias de las partículas, es necesario determinar la posible concentración a partir de dichas ubicaciones. Para ello, existen diversos métodos, tales como particle-in-cell y particle-wall, y más recientemente el uso de estimaciones no paramétricas de funciones de densidad que ofrecen mayor exactitud, como el método kernel. En este proyecto se consideraron los métodos de particle-in-cell (PIC por sus siglas en inglés) en un principio para determinar la concentración de una forma simple y posteriormente el método de densidad de kernel. Así, una vez determinada la distribución de las partículas en las cuales se distribuyó la concentración emitida inicialmente, se determinará la dispersión de la emisión de acuerdo a la velocidad del viento, la distancia recorrida y la posición encontrada.

El método PIC es un método sencillo para determinar a priori la posible dispersión de la emisión, y al igual que el modelo estocástico, se programó inicialmente en Excel para validar el procedimiento desarrollado. En este caso, se enlazó el modelo estocástico lagrangiano con el método PIC para determinar la concentración en un punto determinado de la trayectoria de las

partículas. Por ejemplo, la Figura 5. 30 es un ejemplo de este método en el cual se ha “mallado”, a través de celdas, el espacio sobre el cual se dispersa el contaminante. En este ejemplo, las celdas tienen una dimensión de 100 metros de largo (a sotavento), 50 metros de ancho (a viento cruzado) y una altura de 50 metros.

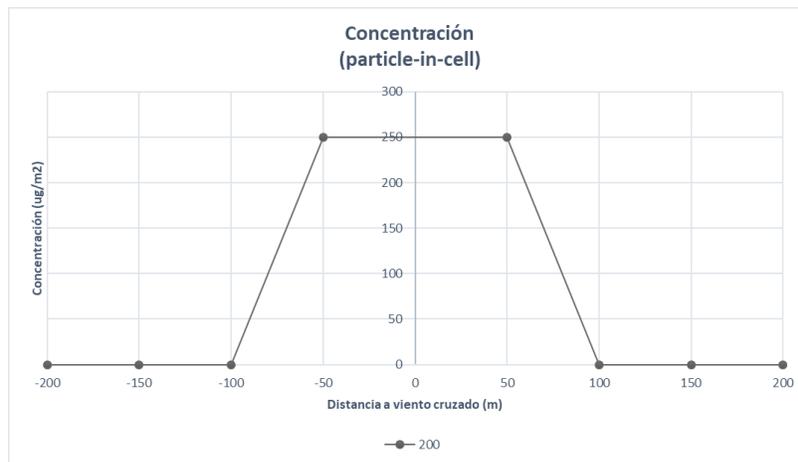


Figura 5. 30. Distribución de la concentración a 200 metros de la fuente con el método PIC.

Si trasladamos la “evolución” de la dispersión siguiendo la trayectoria a sotavento, obtendríamos la Figura 5. 31.

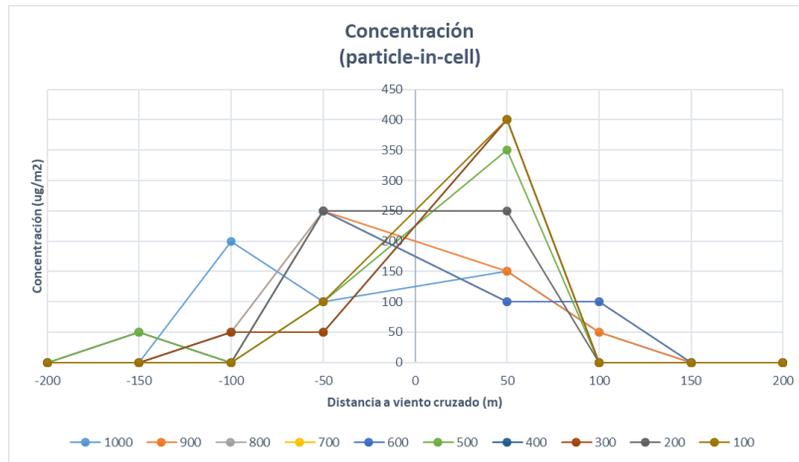


Figura 5. 31. Representación en 2D de la evolución de la dispersión a través de 1000 metros.

Si bien Excel no cuenta con muchas herramientas para desarrollar gráficas en 3D, se trató de graficar el recorrido de la dispersión sobre los 1000 metros con una representación tridimensional, el resultado se puede apreciar en la Figura 5. 32.

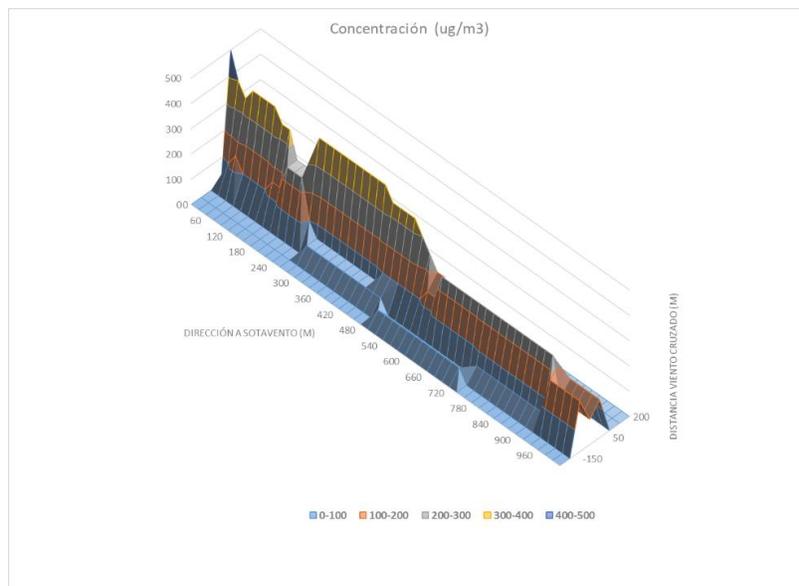


Figura 5. 32. Representación en 3D de la trayectoria de la dispersión a 1,000 metros.

Posteriormente se implementó el método kernel para determinar de una forma más precisa la dispersión del metano entérico. A diferencia del método PIC, este método requiere de más cálculos

computacionales debido a los puntos de interés sobre el eje a viento cruzado en el cual se desea calcular la distribución.

La Figura 5. 33 representan los cálculos de la distribución kernel para cada una de las posiciones de las 10 partículas (representadas como $K(n)$) y cada uno de los renglones representa una distancia de medio metro sobre el eje de viento cruzado (eje y). Al final se suman las concentraciones encontradas para cada una de las funciones en el mismo punto de interés.

Kernel Estimator Density											
y0	KERNEL DENSITY FUNCTION K(x)										EK(x)
	K(1)	K(2)	K(3)	K(4)	K(5)	K(6)	K(7)	K(8)	K(9)	K(10)	
-2	0.002791883	0.030429734	0.338761821	0.527619629	0.301542737	0.185505146	0.106679026	0.004519678	6.09202E-06	3.32113E-13	1.497855746
-1.5	0.00254506	0.028407936	0.329089236	0.521975548	0.311117892	0.193420973	0.112285787	0.004932875	6.97164E-06	4.10486E-13	1.503782279
-1	0.002318202	0.026499262	0.319437178	0.515978895	0.3207404	0.201513307	0.118092712	0.005379542	7.97187E-06	5.06948E-13	1.509967471
-0.5	0.002109877	0.02469906	0.309820256	0.509643256	0.330396099	0.20977632	0.124100626	0.005861963	9.10833E-06	6.25578E-13	1.516416565
0	0.001918737	0.023002744	0.30025256	0.502982865	0.340070311	0.218203523	0.130309899	0.006382538	1.03985E-05	7.71351E-13	1.523133577
0.5	0.001743518	0.021405798	0.290747638	0.496012547	0.349747881	0.226787764	0.136720429	0.006943786	1.18619E-05	9.50332E-13	1.530121224
1	0.001583033	0.01990379	0.281318463	0.48874767	0.359413204	0.235521221	0.14333161	0.007548346	1.35204E-05	1.16991E-12	1.537380857
1.5	0.001436171	0.018492375	0.271977415	0.48120408	0.369050272	0.244395404	0.150142315	0.008198979	1.53985E-05	1.43906E-12	1.54491241
2	0.001301892	0.017167307	0.262736258	0.473398053	0.378642707	0.253401154	0.157150875	0.008898573	1.75234E-05	1.76872E-12	1.552714342

Figura 5. 33. Tabla de cálculos de la distribución kernel en un rango de 2 metros a viento cruzado.

Una vez que se han encontrado todas las funciones kernel para cada una de las partículas durante la trayectoria a sotavento del contaminante, se suman y se obtiene la dispersión. Por ejemplo, en la Tabla de cálculos de la distribución kernel en un rango de 2 metros a viento cruzado. se puede ver la distribución del contaminante sobre el eje y a 1,000 metros de la fuente de emisión generada por 10 partículas considerando una emisión de 1 gr/s y una altura de 25 metros.

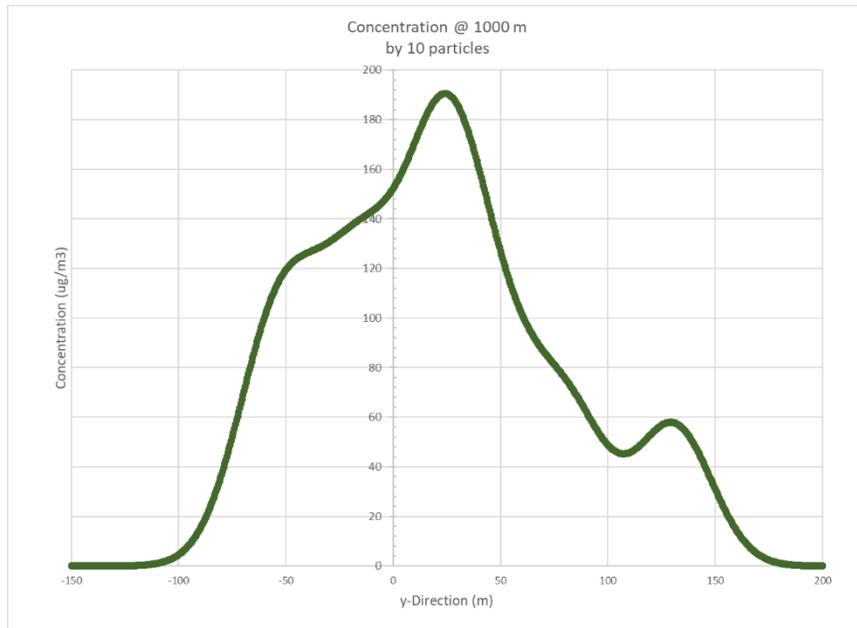


Figura 5. 34. Tabla de cálculos de la distribución kernel en un rango de 2 metros a viento cruzado.

Desarrollo del modelo en Matlab

Posteriormente se implementaron los algoritmos en Matlab, permitiendo así un mejor procesamiento de los datos en cuanto a tiempo y visualización, teniendo capacidad de modelación de miles de partículas. Los datos que alimentaron a estos modelos provenían por un lado de un archivo en Excel con información meteorológica de la estación, los cuales eran leídos y almacenados en una estructura. Por otro lado, se accedía a otro archivo en Excel que contenía las concentraciones detectadas por los nodos sensores, el cual era actualizado continuamente con datos de los nodos en intervalos de 10 minutos. La Tabla 5 - 14Figura 5. 34 muestra un ejemplo del archivo en Excel al cual se accedía para obtener la concentración de la fuente de emisión (mV).

Tabla 5 - 14. Tabla que contiene la información de los nodos de la WSN.

Date	Hour	Nodes	Value	SW
16/04/20	7:59	0x06	3439	0
16/04/20	8:00	0x04	3327	0
16/04/20	8:01	0x03	3105	0
16/04/20	8:09	0x06	3548	0
16/04/20	8:10	0x04	3753	0
16/04/20	8:11	0x03	3220	0
16/04/20	8:19	0x06	3724	0
16/04/20	8:20	0x04	3328	0
16/04/20	8:22	0x03	3300	0
16/04/20	8:30	0x04	3497	0
16/04/20	8:30	0x06	3497	0
16/04/20	8:32	0x03	3500	0
16/04/20	8:40	0x04	3740	0
16/04/20	8:41	0x06	3740	0
16/04/20	8:43	0x03	3440	0
16/04/20	8:50	0x04	3834	0
16/04/20	8:52	0x06	3655	0
16/04/20	8:53	0x03	3680	0
16/04/20	9:00	0x04	3694	0
16/04/20	9:03	0x03	3600	0
16/04/20	9:03	0x06	3585	0
16/04/20	9:10	0x04	3837	0
16/04/20	9:13	0x06	3814	0
16/04/20	9:13	0x03	3300	0

Una vez almacenada la concentración acumulada y los parámetros meteorológicos en los archivos de Excel, se tuvieron que transformar el valor almacenado en mV a ppm para ser empleados por los modelos de dispersión y de concentración. Así, la concentración en mV, se convirtió en ppm y posteriormente con Matlab a un valor con unidades de mg/s. Para ello, primero se obtuvo el volumen molar (litros por mol) de la sustancia.

$$V = \frac{nRT}{P} \quad (5.7)$$

Donde: V es el volumen molar, n es el número de moles, R es la constante de los gases ideales (0.08206), T es la temperatura en °K (se realiza una conversión porque la estación la proporciona en °C) y P es la presión atmosférica (se realiza una conversión pues la estación la proporciona en Pa). Posteriormente el volumen molar es convertido a una concentración de mg/m³.

$$\frac{mg}{m^3} = \frac{\text{Peso molecular}}{\text{Volumen molar}} \times ppm \quad (5.8)$$

Donde el peso molecular es igual a 16.04 para el metano y ppm es la lectura acumulada proveniente de los nodos sensores.

A una escala mayor, el tiempo de cálculo en las concentraciones y su graficación se incrementó conforme se incrementaba el número de partículas. El modelo gaussiano ya no fue implementado en Matlab, únicamente se enfocó el modelo de dispersión estocástico, el método PIC y kernel.

La Figura 5. 35 corresponde al modelo de dispersión estocástico simulando la trayectoria de 100,000 partículas con los siguientes parámetros: $T_{i,L} = 100 \text{ s}$, $u = 2 \frac{\text{m}}{\text{s}}$, $\sigma_v = 0.2 \frac{\text{m}}{\text{s}}$, $\Delta t = 10 \text{ s}$. En esta simulación se consideró una distancia máxima de 1,000 a sotavento a partir de la fuente de emisión, así como una dispersión de hasta 300 metros sobre el eje y.

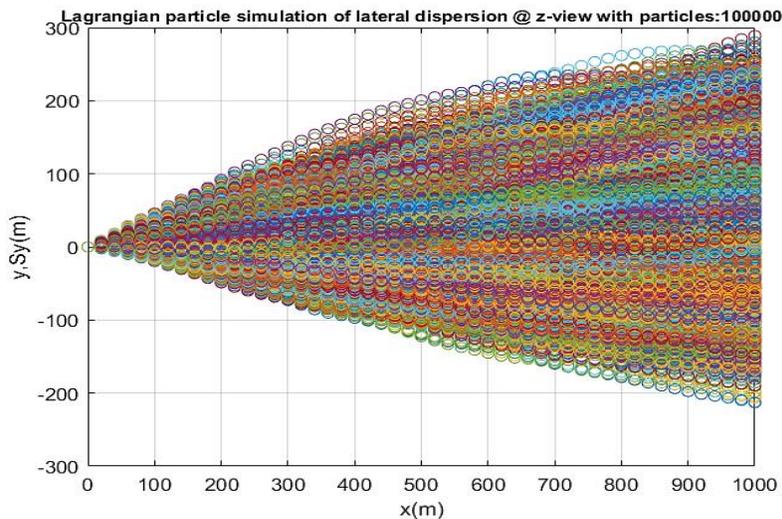


Figura 5. 35. Dispersión de 100,000 partículas a una distancia de 500 m. empleando Matlab.

Se puede apreciar que los resultados son aceptables en cuanto al movimiento aleatorio que se buscaba desarrollar, así como la dispersión del contaminante pues a 1,000 se puede ver que la distribución en el eje y cubre una distancia superior a los 500 metros sobre el eje y.

Respecto a las simulaciones de los métodos para medir la concentración del contaminante a ciertas distancias, Matlab ofrece mejores herramientas para la generación y manipulación de la imagen generada en 3D. Considerando el ejemplo anterior de 100,000 partículas y determinando la concentración cada 10 metros a sotavento, equivalente al largo de la celda, 20 metros sobre el eje y, representado por el ancho de la celda, y teniendo como límite de dispersión, una distancia de 600 metros. Los resultados obtenidos se muestran en la Figura 5. 36 Figura 5. 36 con un tiempo de simulación total de 153 segundos.

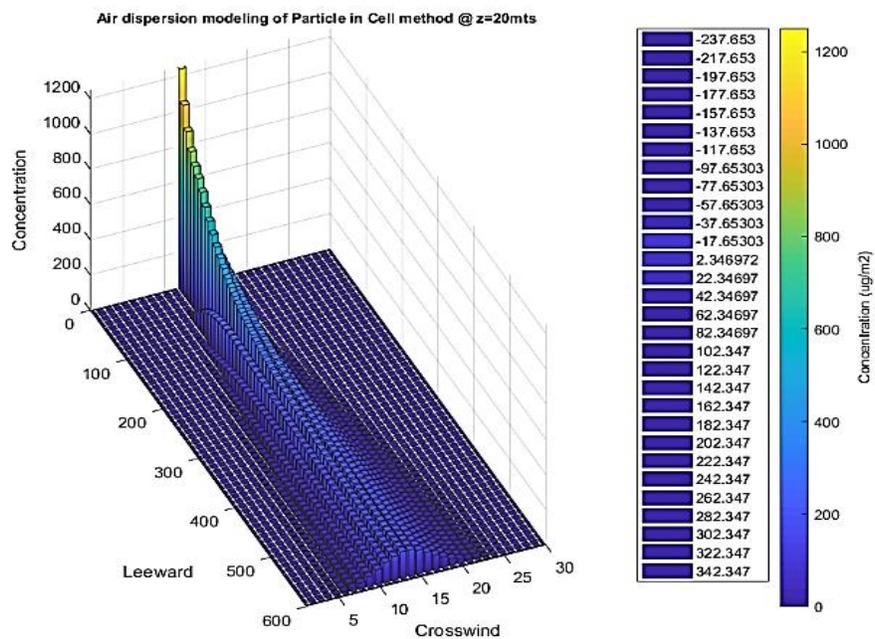


Figura 5. 36. Concentración considerando 100,000 partículas usando Particle-In-Cell.

Para el método kernel, se consideraron las mismas características que el método anterior, y aprovechando el potencial que tiene Matlab, al encontrar cada una de las distribuciones de concentración para cada uno de los pasos a sotavento, nos permite unir todas las gráficas en una

sola gráfica 3D en la cual se puede ver la evolución de la dispersión y concentración del metano entérico a través de los 1,000 metros. La Figura 5. 36 muestra lo anteriormente expuesto.

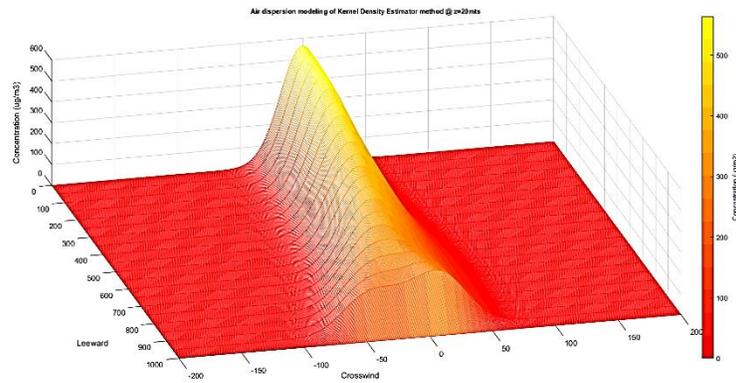


Figura 5. 37. Distribución de la concentración sobre 1,000 m.

Aplicación al proyecto

Una vez validados los programas en Matlab, se emplearon los datos obtenidos por parte de la red inalámbrica y de la estación meteorológica para alimentar los modelos. Las siguientes figuras muestran la posible dispersión de la concentración del metano entérico medido por la WSN.

El día 26 de mayo a las 02:50 a.m. se presentaron las siguientes condiciones climáticas: velocidad del viento a 2.2 m/s, fluctuación de velocidad de 0.36, temperatura de 297°K y presión atmosférica de 1,009 bars, con una concentración acumulada de 2,700 ppm en un sensor de la zona 1. A partir de esa información, se modeló la dispersión de 385 partículas equivalentes a la concentración bajo las condiciones meteorológicas establecidas. La Figura 5. 38 muestra la posición aleatoria que recorren las partículas durante una distancia de 500 metros a sotavento.

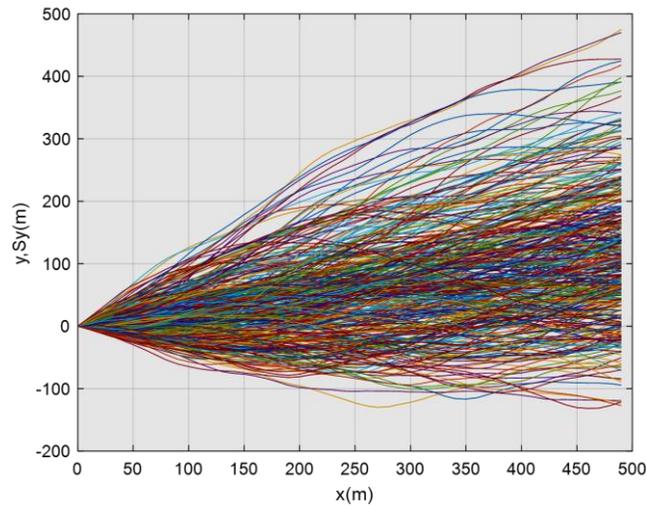


Figura 5. 38. *Dispersión de metano entérico en un sensor de la zona 1, 26 de mayo.*

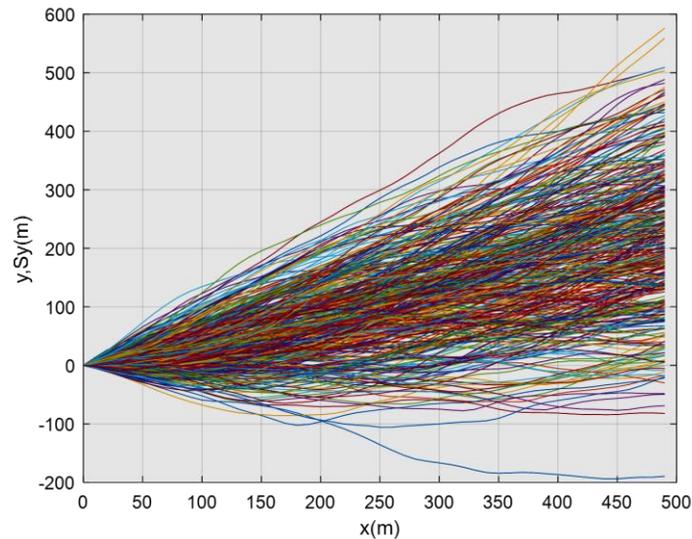


Figura 5. 39. *Dispersión de metano entérico en un sensor de la zona 2, 22 de junio.*

La Figura 5. 39 es otro ejemplo, en este caso, el día 22 de junio a las 19:10 hrs se presentaron las siguientes condiciones climáticas: velocidad del viento a 3.1 m/s, fluctuación de velocidad de 0.36, temperatura de 310°K y presión atmosférica de 1,001 bars, con una concentración acumulada de 29,518 ppm detectado en la zona 2. A partir de esa información, se modeló la dispersión de 500 partículas equivalentes a la concentración y condiciones meteorológicas.

En la zona 3, el día 17 de junio a las 10:00 hrs se presentaron las siguientes condiciones climáticas: velocidad del viento a 1.3 m/s, fluctuación de velocidad de 0.55, temperatura de 300°K y presión atmosférica de 1,009 bars, con una concentración acumulada de 25,993 ppm detectada. La dispersión modelada considerando la concentración y condiciones meteorológicas se puede ver en la Figura 5. 40

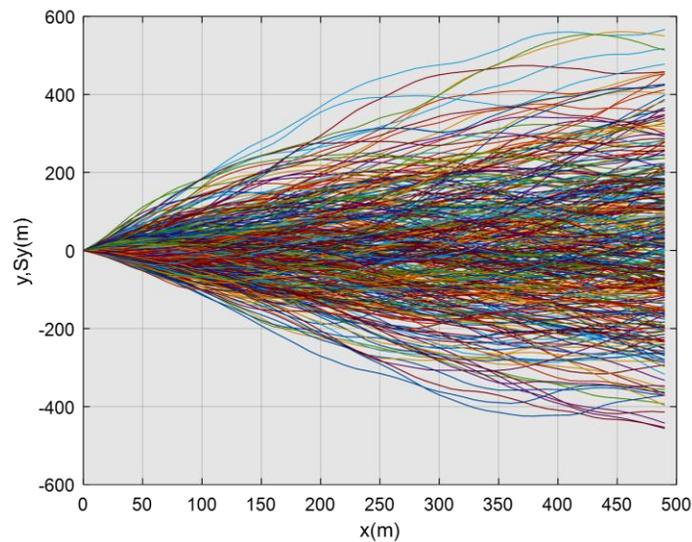


Figura 5. 40. Dispersión de metano entérico en un sensor de la zona 3, 17 de junio.

Una vez determinadas las trayectorias de las partículas, se procedió a desarrollar las estimaciones de concentración, los resultados fueron los siguientes:

Para la dispersión modelada en la zona 1, representada por la Figura 5. 38, la distribución de la concentración se muestra en la Figura 5. 41.

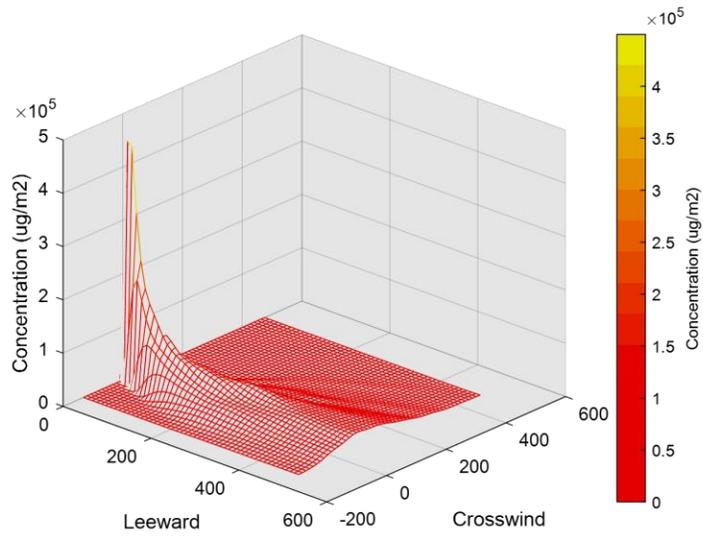


Figura 5. 41. Distribución de la concentración detectada en un nodo de la zona 1.

La distribución de concentración relacionada con la dispersión encontrada en la zona 2 se aprecia en la Figura 5. 42

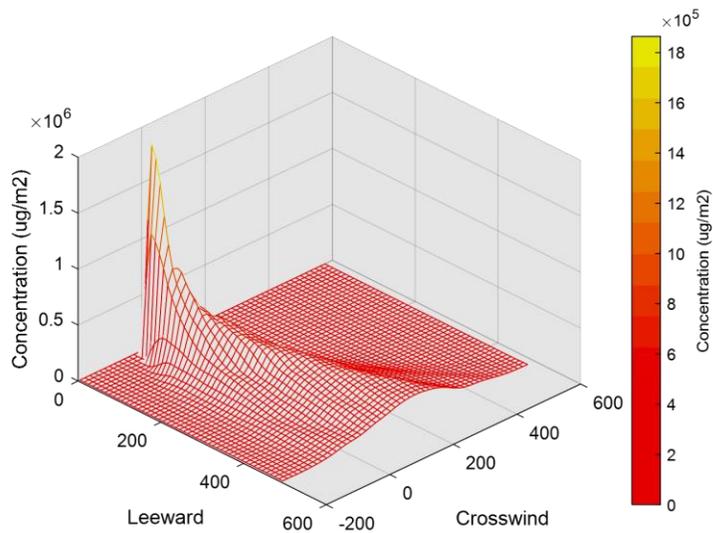


Figura 5. 42. Distribución de la concentración detectada en un nodo de la zona 2.

Finalmente, la distribución de la concentración presentada en un nodo de la zona 3 se puede ver en la Figura 5. 43.

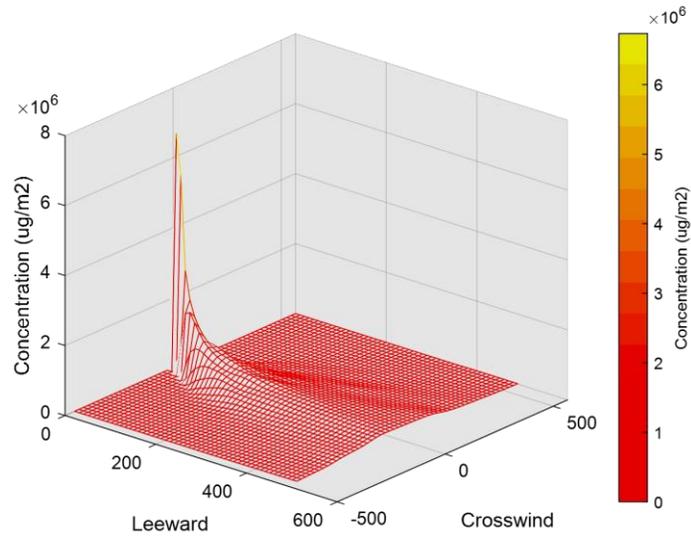


Figura 5. 43. Distribución de la concentración detectada en un nodo de la zona 3.

CAPÍTULO 6:
CONCLUSIONES

6.1. Discusiones

En las Tabla 6 - 1. Emisiones totales por fermentación entérica por nivel. podemos ver las estimaciones encontradas por nivel derivadas de la fermentación entérica y la gestión del estiércol, respectivamente. Como se puede apreciar, la estimación de nivel 1 derivada de la fermentación entérica genera valores aproximados de emisión muy por encima de los estimados en el nivel 2. En nuestro caso, el diferencial entre ambos valores reside en el factor de emisión. Por un lado, el parámetro en el nivel 1 es muy elevado, 109 para vacas lecheras, sin embargo, dicho valor se basa en bovinos que producen leche y carne, que no es nuestro caso. Y por el otro lado, el parámetro en el nivel 2, el factor de conversión de metano se basa en el grado en el que la energía de los alimentos se convierte en CH₄, es decir, factores alimentarios y la producción del animal, es decir, en nuestro caso, ganado lechero totalmente (Holstein). Por lo que es claro que para este tipo de estimación es importante establecer un ajuste, al menos en el nivel 1, que permita generar estimaciones más precisas al considerar como base la orientación de producción del animal, un valor independiente para razas lecheras, otro para razas productoras de carne y otro para mixtas (leche y carne), en el factor de emisión. Existen diversos trabajos que han propuesto ajustes en los parámetros de estimación de metano considerando un parámetro dedicado para vacas productoras de leche en el nivel 1, presentando mejores resultados cuando se comparan las estimaciones calculadas con mediciones de SF₆, GF o RC.

Tabla 6 - 1. Emisiones totales por fermentación entérica por nivel.

Nivel de estudio	Estimación (GgCH₄/año)
Nivel 1	0.035202
Nivel 2	0.004168289

Para el caso de las emisiones derivadas de la gestión del estiércol, nuestros resultados están cercanos entre el nivel 1 y nivel 2 (Tabla 6 - 2), lo que se pudiera pensar de forma inicial es que las fórmulas para las estimaciones son adecuadas, sin embargo, es importante mencionar que las estimaciones de nivel 1 se clasifican de acuerdo a un sistema de gestión de estiércol y en combinación con la temperatura promedio anual para definir el factor de emisión. En nuestro caso, el establo cuenta con dos sistemas de gestión de estiércol, de los cuales, solo se consideró uno para determinar el factor de emisión: camas profundas (Debido a que el biodigestor tiene una producción mínima de metano). Más aún, podemos decir de forma general que puede presentarse el caso en el que coexistan dos o más sistemas de gestión, por lo que deberían de calcularse factores de emisión para cada tipo de sistema. Situación que no se considera en las ecuaciones de nivel 1 y que debería tomarse en cuenta para obtener una aproximación más real.

Tabla 6 - 2. Emisiones totales por gestión de estiércol por nivel.

Nivel de estudio	Estimación (GgCH₄/año)
Nivel 1	0.020892
Nivel 2	0.04512

Una vez que se han calculado las estimaciones de acuerdo a los lineamientos del IPCC considerando las características del caso de estudio, es importante realizar un comparativo entre dichos valores y las emisiones colectivas detectadas por la WSN. Si bien se han hecho estudios comparativos entre este tipo de estimación o entre técnicas de medición de metano entérico, como GF, RC o SF₆, sus procedimientos, y por ende sus resultados, han sido de forma individual, es decir, los estudios y análisis se aplican a rumiantes de forma individual, por lo que los resultados muestran una parte proporcional del estudio y de ahí se generaliza, p.e. P. Huhtanen et al (2018), C.S. Cunha et al (2016), Hristov (2015), P. C. Garnsworthy et al (2012), etc. En nuestro caso, al

emplear la WSN como herramienta de medición, nos permite obtener lecturas representativas de un mayor conjunto de individuos, por lo que los resultados pueden ser más fácilmente comparables con las estimaciones, en un sentido global. De igual forma, las mediciones realizadas por la WSN son continuas, es decir, constantemente se reciben lecturas. No así en otros estudios, ya que la medición se realiza cuando el animal se encuentra alimentándose (mediciones discretas), por ejemplo.

Respecto a este estudio, el comparativo entre las estimaciones de nivel 2 y las emisiones de la WSN, arroja que la emisión es muy superior a la estimación realizada, con valores superiores de hasta 10 veces. Si bien fue necesario realizar una aproximación para la medición anual, de acuerdo a la tasa promedio mensual calculada a partir de las emisiones obtenidas en el periodo de muestreo (72 días), los valores comparados en periodos menores, como por ejemplo un periodo mensual, se mantiene el incremento proporcional en la medición, e incluso es mayor en el mes de junio. Respecto a las mediciones de la WSN podemos mencionar que constantemente se recibieron lecturas bajas de los sensores, lo que confirma que los rumiantes constantemente están emitiendo metano y no únicamente cuando se alimentan, situación que muchos estudios no consideran pues solo se enfocan en la medición cuando come el animal. Consideramos además que el número de nodos empleados en la red fue muy justo, o incluso reducido, por lo que podemos decir que los valores obtenidos en los nodos no representan el total de la emisión real.

Tabla 6 - 3. Comparativo entre la estimación total de nivel 2 y las emisiones detectadas por la WSN.

Estimación total de metano entérico de nivel 2 (GgCH ₄ /año)	0.049168
Emisión total de metano entérico registrada por la WSN (GgCH ₄ /año)*	0.4279
*El valor de la emisión es aproximado, de acuerdo a la tasa promedio mensual calculada a partir de las emisiones obtenidas en toda la WSN	

6.2. Conclusiones

- El objetivo general planteado en este proyecto se alcanzó al desarrollar los métodos de estimación de nivel 1 y nivel 2 planteados por el IPCC, cuya metodología se presentó en el capítulo 4 y los resultados en el capítulo 5, más específicamente, en las Tabla 5 - 8, Tabla 5 - 9, Tabla 5 - 101 y Tabla 5 - 12. Adicionalmente, se instaló una WSN de bajo costo, si bien, no se cubrió el área deseada, se colocaron nodos en punto de mayor concentración de ganado en busca de muestras representativas. Posteriormente, con las concentraciones de metano entérico medidas y empleando una estación meteorológica *ex situ*, se aplicó un modelo estocástico lagrangiano simple, que permitiera estimar el grado de dispersión y distribución de la concentración.
- En referencia a los objetivos específicos, el análisis de la dispersión del metano en un área determinada no se cubrió en su totalidad debido a la falta de datos meteorológicos presentes en el área de interés. Con respecto a la divulgación de los resultados del estudio de dispersión, así como el monitoreo realizado a la(s) entidad(es) correspondiente(s), se cumplió parcialmente al informar al comité tutorial los resultados obtenidos. El reporte a la autoridad correspondiente se encuentra pendiente de realizar debido a la crisis sanitaria por COVID-19, se espera que el próximo año las condiciones sean favorables para cumplir con este objetivo.
- Finalmente, se desarrolló un artículo científico y se publicó en una revista indexada con el tema referente a la WSN empleada en este proyecto. Además, se encuentra otro artículo sometido en una revista de carácter científico ubicada dentro del *Journal Citation Reports*. Se espera que al término de esta tesis, en un periodo no mayor a un mes, se tenga una respuesta de la solicitud de publicación.

- Una constante encontrada en los diversos estudios analizados en esta propuesta, y corroborada más tarde en el desarrollo de este proyecto, es que las directrices que presenta el IPCC para la estimación de metano llegan a ser insuficientes o estar acotadas para algunos grupos de ganado, generando diferencias amplias con los métodos tradicionales de medición empleados. Por ejemplo, C.S. Cunha et al. (2016) encontraron en su estudio que las ecuaciones presentadas, en el caso de las vaquillas, están basadas en la raza vacuna Angus, la cual es empleada en producción de carne, generando estimaciones sesgadas, especialmente por las vaquillas con bajo peso corporal y que dicha teoría fue corroborada en este estudio.
- Los valores obtenidos con las fórmulas para vaquillas de mayor peso (350 – 450 kg) y para baja producción de leche (las llamadas vacas secas) fueron, en promedio, muy similares a los reportados en estudios empleando la técnica de SF₆. Por lo anterior es importante actualizar dichos lineamientos, al menos para las estimaciones de nivel 1, donde se considere la diversificación de múltiples variables, como las razas, condiciones climáticas, mezcla de sistemas de gestión en un mismo establo, etc.
- El comparativo entre las estimaciones de nivel 2 y las emisiones detectadas por la WSN confirman claramente que existe una desvaloración de los lineamientos para el cálculo de la estimación, lo que refleja que el problema de generación de metano entérico en el mundo es mucho mayor de lo que se calcula a través de estas guías.
- Es importante considerar acciones que vayan orientadas a la disminución de la producción de metano entérico, tales como el mejoramiento de la nutrición del ganado, modificadores del rumen (Knapp, 2016), modificación genética animal, disminución del estrés térmico animal, promoción de vegetación perenne en el paisaje agrícola (Baah-Acheamfour, 2016), ecologización en el uso de la tierra (Solazzo, 2016), por mencionar algunos. Todos ellos deben

involucrar un compromiso e inversión importante no sólo de los dueños de los establos, sino también involucrar al gobierno en sus diversos niveles.

- Particularmente en la región lagunera, una alternativa para la reducción de metanogénesis se presenta en los suelos anaeróbicos anegados, los cuales son generados por las heces y orines de los rumiantes y proporciona un ambiente ideal para el proceso de metanogénesis (Sandeep, 2016), aprovechándolos como una fuente energética alternativa a través de los biodigestores.

6.3. Trabajos futuros

Como trabajos futuros basados en este proyecto, se pueden presentar:

- Aumentar el número de nodos para tener una mayor cobertura, convirtiéndola en una WSN tridimensional.
- Proponer nuevos parámetros para el cálculo de la estimación a partir del estudio de otros establos de la región con condiciones diferentes.
- Otra línea a desarrollar consiste en la implementación de un método que permita determinar con mejor precisión las trayectorias de las partículas e incorporarlas a un GIS (Sistema de información geográfica) para poder representar la dispersión de las concentraciones sobre el área real.
- Aplicar otros métodos de dispersión al mismo caso de estudio, tales como el modelo estocástico lagrangiano hacia atrás, Filtro Kalman Bayessiano extendido, método Bayessiano inverso, modelo de dispersión Gaussiano inverso.

**REFERENCIAS
BIBLIOGRÁFICAS**

- A. Somov (2015). "Compact Low Power Wireless Gas Sensor Node With Thermo Compensation for Ubiquitous Deployment," in *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 11, no. 6, pp. 1660-1670, Dec. 2015, doi: 10.1109/TII.2015.2423155.
- Alexander Baranov, Denis Spirjakin, Saba Akbari, Andrey Somov (2015), Optimization of power consumption for gas sensor nodes: A survey, *Sensors and Actuators A: Physical*, Volume 233, 2015, Pages 279-289, ISSN 0924-4247, <https://doi.org/10.1016/j.sna.2015.07.016>.
- Bogue, R. (2012), "Solar-powered sensors: a review of products and applications", *Sensor Review*, Vol. 32 No. 2, pp. 95-100. <https://doi.org/10.1108/02602281211209374>
- Cuevas-Martinez, J. C., Gadeo-Martos, M. A., Fernandez-Prieto, J. A., Canada-Bago, J., & Yuste-Delgado, A. J. (2010). Wireless Intelligent Sensors Management Application Protocol-WISMAP. *Sensors*, 10(10), 8827–8849. doi:10.3390/s101008827
- Choi, S., Kim, N., Cha, H., & Ha, R. (2009). Micro Sensor Node for Air Pollutant Monitoring: Hardware and Software Issues. *Sensors*, 9(10), 7970–7987. doi:10.3390/s91007970
- Chou, J. In *Hazardous Gas Monitors—A Practical Guide to Selection, Operation and Applications*; McGraw-Hill and SciTech Publishing: New York, NY, USA. Chapter 2, 27–35, 1999.
- Devarakonda, S., Sevusu, P., Liu, H., Liu, R., Iftode, L., & Nath, B. (2013). Real-time air quality monitoring through mobile sensing in metropolitan areas. In *2nd International Workshop on Urban Computing, UrbComp 2013 - Held in Conjunction with KDD 2013 (Proceedings of the ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining)*. <https://doi.org/10.1145/2505821.2505834>
- Dong H, Mangino J, McAllister TA, Hatfield JL, Johnson DE, Lassey KR, Aparecida de Lima M, Romanovskaya A (2006). Directrices del IPCC de 2006 para los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero. Volumen 4: Agricultura, silvicultura y otros usos de la tierra, Capítulo 10: Emisiones resultantes de la gestión del ganado y del estiércol.
- Dziadak, Bogdan & Makowski, Lukasz & Michalski, A.. (2016). Survey of Energy Harvesting Systems for Wireless Sensor Networks in Environmental Monitoring. *Metrology and Measurement Systems*. 23. 10.1515/mms-2016-0053.
- Echeverri Londoño, Carlos Alberto. (2006). Estimación de la emisión de gases de efecto invernadero en el municipio de Montería (Córdoba, Colombia). *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, 5(9), 85-96. Retrieved October 27, 2021, from http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1692-33242006000200008&lng=en&tlng=es.
- Hajiyev, Chingiz. (2016). Sensor Calibration Design Based on D-Optimality Criterion. *Metrology and Measurement Systems*. 23. 10.1515/mms-2016-0029.
- Hasan Omar Al-Sakran (2015), "Intelligent Traffic Information System Based on Integration of Internet of Things and Agent Technology" *International Journal of Advanced Computer Science and Applications(IJACSA)*, 6(2). <http://dx.doi.org/10.14569/IJACSA.2015.060206>
- Huircán, J.I., Muñoz, C., Young, H., Von Drossow, L., Bustos, J. Vivallo, G., Toneatti, M., (2010). ZigBee-based wireless sensor network localization for cattle monitoring in grazing field. *Computers and Electronics in Agriculture* 74, 258–264. DOI:10.1016/j.compag.2010.08.014.

- I.F. Akyildiz, W. Su, Y. Sankarasubramaniam, E. Cayirci (2002), *Wireless sensor networks: a survey*, *Computer Networks*, Volume 38, Issue 4, Pages 393-422, ISSN 1389-1286, [https://doi.org/10.1016/S1389-1286\(01\)00302-4](https://doi.org/10.1016/S1389-1286(01)00302-4).
- J. Yu, R.M.A. Hahne, *Air analysis*. *Encyclopedia of Analytical Science*, Elsevier, Second Edition, 2005.
- Jacob, D. J., Turner, A. J., Maasackers, J. D., Sheng, J., Sun, K., Liu, X., Chance, K., Aben, I., McKeever, J., and Frankenberg, C (2016). Satellite observations of atmospheric methane and their value for quantifying methane emissions, *Atmos. Chem. Phys.*, 16, 14371–14396, <https://doi.org/10.5194/acp-16-14371-2016>.
- Janata, J. *Principles of Chemical Sensors*, 2nd ed., Springer Science & Business Media, 2009.
- Kheirbek, I., Wheeler, K., Walters, S. et al (2013). PM2.5 and ozone health impacts and disparities in New York City: sensitivity to spatial and temporal resolution. *Air Qual Atmos Health* 6, 473–486. <https://doi.org/10.1007/s11869-012-0185-4>
- Lazik, D., & Sood, P. (2016). Approach for Self-Calibrating CO2 Measurements with Linear Membrane-Based Gas Sensors. *Sensors*, 16(11), 1930. doi:10.3390/s16111930
- Leidinger, Martin, Schultealbert, Caroline, Neu, Julian, Schütze, Andreas, & Sauerwald, Tilman (2018). Characterization and calibration of gas sensor systems at ppb level—a versatile test gas generation system. *Measurement Science and Technology*, 29(1), 10. doi:101088/1361-6501/aa91da
- Lewis, A., Edwards, P. Validate personal air-pollution sensors (2016). *Nature* 535, 29–31. <https://doi.org/10.1038/535029a>
- Li, F., et al. (2012). Localized geometric topologies with bounded node degree for three-dimensional wireless sensor networks. *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking* 1, 157. DOI:10.1186/1687-1499-2012-157.
- Ma, Y., Richards, M., Ghanem, M., Guo, Y., & Hassard, J. (2008). Air Pollution Monitoring and Mining Based on Sensor Grid in London. *Sensors*, 8(6), 3601–3623. MDPI AG. Retrieved from <http://dx.doi.org/10.3390/s80603601>
- Mohd Fauzi Othman, Khairunnisa Shazali (2012). *Wireless Sensor Network Applications: A Study in Environment Monitoring System*, *Procedia Engineering*, Volume 41, Pages 1204-1210, ISSN 1877-7058, <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2012.07.302>.
- Moreu, F., Kim, R. E., & Spencer, B. F. (2017). Railroad bridge monitoring using wireless smart sensors. *Structural Control and Health Monitoring*, 24(2), [e1863]. <https://doi.org/10.1002/stc.1863>
- ORGANIZACIÓN DE LAS NACIONES UNIDAS (1998): Protocolo de Kioto de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio climático FCCC/INFORMAL/83*GE.05-61702 (S) 130605.
- P. Oikonomou, A. Botsialas, A. Olziersky, I. Kazas, I. Stratakos, S. Katsikas, D. Dimas, K. Mermikli, G. Sotiropoulos, D. Goustouridis, I. Raptis, M. Sanopoulou. (2016). A wireless sensing

system for monitoring the workplace environment of an industrial installation. *Sensors and Actuators B: Chemical* 224, 266-274. DOI: 10.1016/j.snb.2015.10.043.

Pummakarnchana, O., Tripathi, N., & Dutta, J. (2005). Air pollution monitoring and GIS modeling: a new use of nanotechnology based solid state gas sensors. *Science and Technology of Advanced Materials*, 6, 251 - 255. DOI:10.1016/j.stam.2005.02.003

R.K. Monson & E.A. Holland; Holland (2001). Biospheric trace gas fluxes and their control over tropospheric chemistry. *Annu. Rev. Ecol. Syst.* 32: 547-576

Rainham, Daniel. (2016). A wireless sensor network for urban environmental health monitoring: UrbanSense. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 34. 012028. 10.1088/1755-1315/34/1/012028.

Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA). La Comarca Lagunera, primer lugar en producción de leche, carne de ave y forrajes. Comunicado de prensa. 6 de septiembre de 2016.

Sun, D. J., Zhang, Y., Xue, R., & Zhang, Y. (2017). Modeling carbon emissions from urban traffic system using mobile monitoring. *The Science of the total environment*, 599-600, 944–951. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.04.186>

Velasco, Alejandro & Ferrero, Renato & Gandino, Filippo & Montrucchio, Bartolomeo & Rebaudengo, Maurizio. (2016). A Mobile and Low-Cost System for Environmental Monitoring: A Case Study. *Sensors*. 16. 710. 10.3390/s16050710.

Wen, T.-H., Jiang, J.-A., Sun, C.-H., Juang, J.-Y., & Lin, T.-S. (2013). Monitoring Street-Level Spatial-Temporal Variations of Carbon Monoxide in Urban Settings Using a Wireless Sensor Network (WSN) Framework. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 10(12), 6380–6396. MDPI AG. Retrieved from <http://dx.doi.org/10.3390/ijerph10126380>

Y. Wang, A. Yang, X. Chen, P. Wang, Y. Wang and H. Yang (2017). "A Deep Learning Approach for Blind Drift Calibration of Sensor Networks," in *IEEE Sensors Journal*, vol. 17, no. 13, pp. 4158-4171, 1 July 2017, doi: 10.1109/JSEN.2017.2703885.

Yi, W., Lo, K., Mak, T., Leung, K., Leung, Y., & Meng, M. (2015). A Survey of Wireless Sensor Network Based Air Pollution Monitoring Systems. *Sensors*, 15(12), 31392–31427. doi:10.3390/s151229859

Yorifuji T, Bae S, Kashima S, Tsuda T, Doi H, Honda Y, Kim H, Hong YC (2015). Health Impact Assessment of PM10 and PM2.5 in 27 Southeast and East Asian Cities. *J Occup Environ Med.* Jul;57(7):751-6. doi: 10.1097/JOM.0000000000000485. PMID: 26147543.