

HERRAMIENTA DE LABORATORIO PARA LA CARACTERIZACIÓN ÓPTICA DE AEROSOL ATMOSFÉRICOS

Daniela Bolaños Marín

Tesis de Maestría presentada como requerimiento parcial para optar al título
de Magíster en Física Aplicada

Directora:
Elena Montilla Rosero

Grupo de Óptica Aplicada
Escuela de Ciencias
Departamento de Ciencias Físicas
Universidad EAFIT

Julio, 2020

A mi familia,

Resumen

El presente trabajo describe el desarrollo de una herramienta de laboratorio para el análisis óptico de aerosoles atmosféricos a través del retroesparcimiento o *backscattering* de la luz incidente. Específicamente se estudia la modificación del estado inicial de polarización de la luz después de la interacción con las partículas, dando información de la forma, tamaño y composición química de las mismas y complementando los análisis *in situ* tradicionales. Con el dispositivo desarrollado se estudia el efecto de variables meteorológicas como la humedad relativa del medio sobre las propiedades físicas y ópticas de las partículas.

La herramienta desarrollada se compone de una cámara a la que se le inyectan aerosoles generados por un fluidizador, un sistema óptico para el envío, la recolección de la luz producida por el retroesparcimiento en las partículas, y la separación y medición de las intensidades del campo óptico paralelo y perpendicular, y un sistema de registro de las señales. La relación entre las intensidades medidas es llamada razón lineal de despolarización LDR (por sus siglas en inglés *linear depolarization ratio*) o δ . Además, se incorporan sensores de humedad relativa y temperatura del aire junto con actuadores que humidifican y deshumidifican el aire dentro de la cámara.

En el contenido de este documento de investigación primero se analiza la relevancia, novedad y objetivos de la investigación en el capítulo introducción. En el capítulo fundamentos teóricos, se conceptualizan los aspectos más importantes acerca de los aerosoles y su interacción con la luz, introduciendo el concepto de *scattering* y presentando una idea resumida de los sistemas Lidar para la medición de aerosoles. También, se explica en detalle la polarización y el efecto de los medios sobre esta propiedad de la luz para finalmente llegar al concepto de despolarización. Al finalizar este capítulo se encuentra el método de corrección de errores en las señales de despolarización, introducidos por aberraciones de polarización en la óptica y los métodos computacionales para la simulación del *scattering* y la despolarización de la luz debido a las partículas.

En el capítulo métodos e instrumentación, se describen los subsistemas del dispositivo implementado para las medidas indicadas, esto es, el fluidizador para la generación de aerosoles, el mecanismo de medición y control de la humedad relativa y la temperatura, y el montaje y calibración del sistema óptico de recolección de luz. En el capítulo resultados, se presentan los valores obtenidos de δ para dos tipos de aerosoles, carbonato de calcio, presente en la atmósfera de Medellín y polvo del Sahara, aerosol de referencia. Además, se analiza el efecto de las variaciones de la humedad relativa sobre las propiedades físicas y ópticas de los aerosoles y sobre la calibración del sistema, así como la comparación de estos resultados experimentales con los resultados teóricos obtenidos mediante simulación.

Finalmente, el desarrollo de este trabajo de investigación para la determinación de la LDR de aerosoles atmosféricos permite destacar la importancia del diseño e implementación de este tipo de herramientas que apoyan y complementan la caracterización óptica de estas partículas, los estudios de formación de las nubes, la detección de fuentes de emisión de contaminantes y la modelación matemática del *scattering* de aerosoles para contribuir a la reducción de la incertidumbre de su influencia en el equilibrio radiativo local y global, y por lo tanto, en el cambio climático.

Agradecimientos

Agradezco de todo corazón a mi directora Elena Montilla Rosero por sus enseñanzas, su acompañamiento, comprensión y dedicación para llevar a cabo este proyecto.

A mi hijo que es lo más lindo de mi vida, por su amor y darme motivación (espero que cuando esté grande lea esta tesis y se sienta orgulloso de su mamá).

A mis padres sin quienes no hubiera podido lograrlo, a mi madre por su atención, tiempo y cuidados, a mi padre por sus consejos, su arduo trabajo y cariño.

A mis compañeros de laboratorio, al profe Daniel de quien guardo sus enseñanzas con mucho cariño a Manu, Carl, Cami, Globo, Juan Jo, René y el profe Carlos por sus críticas constructivas y espacios compartidos y a los técnicos de laboratorio Jair, Lucho y Hérica quienes siempre me brindaron su apoyo incondicional.

A mis amigos y hermanos Esteban, Caro, Migue, Eliza, Jonathan, Natalia, Jeny por hacerme la vida más alegre.

Finalmente, agradezco a la Universidad EAFIT por la beca para realizar esta investigación y por los años de formación y a COLCIENCIAS por la beca jóvenes investigadores.

Contenido

| | |
|---|----|
| Resumen..... | 3 |
| <i>Agradecimientos</i> | 5 |
| Lista de Figuras..... | 8 |
| Lista de Tablas | 10 |
| INTRODUCCIÓN..... | 12 |
| 1.1 Planteamiento del problema | 13 |
| 1.2 Objetivos | 14 |
| 1.2.1 General | 14 |
| 1.2.2 Específicos | 14 |
| 1.3 Estado del arte | 15 |
| FUNDAMENTOS..... | 21 |
| 2.1 La atmósfera..... | 21 |
| 2.2 Aerosoles atmosféricos..... | 22 |
| 2.2.1 Interacción luz-partícula: propiedades ópticas de los aerosoles..... | 26 |
| 2.2.2 Efectos de la humedad relativa en las propiedades microfísicas y ópticas de los aerosoles | 31 |
| 2.3 Polarización | 34 |
| 2.3.1 Descripción matricial de la polarización | 36 |
| 2.3.2 Propiedades polarimétricas de un medio..... | 38 |
| a. Diatenuación | 38 |
| b. Birrefringencia | 39 |
| c. Despolarización y Polarizancia | 39 |
| 2.4 Técnica Lidar..... | 40 |
| 2.5 Calibración de señales de despolarización por scattering | 41 |
| 2.6 Métodos computacionales para la predicción de scattering de partículas | 43 |
| MÉTODOS E INSTRUMENTACIÓN | 46 |
| 3.1 Montaje experimental para la obtención de las condiciones atmosféricas en laboratorio. .. | 46 |
| 3.1.1 Sistema de control de Humedad Relativa (HR) y Temperatura (T). | 46 |
| 3.1.2 Sistema de generación de aerosoles. | 50 |

| | |
|---|----|
| 3.2. Configuración del sistema óptico de emisión y recolección de <i>backscattering</i> de aerosoles. | 54 |
| 3.2.1 Análisis de los efectos de los elementos ópticos sobre la polarización de la luz. | 59 |
| 3.2.2. Calibración del sistema | 62 |
| 3.3. Montaje experimental integrado | 63 |
| RESULTADOS Y DISCUSIÓN | 67 |
| 4.1. Análisis de ruido en el sistema | 67 |
| 4.2. Procesamiento de la Señal | 69 |
| 4.3. Calibración del sistema para las señales de despolarización por <i>backscattering</i> . | 70 |
| 4.4. Determinación de la razón lineal de despolarización volumétrica (δv) y de partículas (δp) para $HR < 60\%$. | 72 |
| 4.5. Determinación de la razón lineal de despolarización volumétrica δv para $HR\% > 65\%$ | 78 |
| 4.6. Simulación de scattering de partículas | 81 |
| 4.6. Determinación de la razón lineal de despolarización volumétrica δv para polvo del Sahara en condiciones de laboratorio. | 82 |
| CONCLUSIONES | 86 |
| TRABAJOS FUTUROS Y RECOMENDACIONES | 88 |
| Bibliografía | 89 |

Lista de Figuras

| | |
|--|----|
| Figura 1. Nubes de polvo producidas en el desierto del Sahara el 17 de agosto del 2017 y transportadas hasta el Golfo de México. [9]..... | 16 |
| Figura 2. Medida de la razón lineal de despolarización de polvo desértico para tres longitudes de onda sobre Barbados 30 de junio e 2013. (a) Parte superior: señal rango corregida para 1064nm. Parte inferior: canal de despolarización para 1064nm. (b)Perfiles verticales de despolarización para [6]. | 17 |
| Figura 3. Esquema del Sistema de medida de la despolarización de aerosoles. [12]..... | 18 |
| Figura 4. Condiciones experimentales para la caracterización óptica de aerosoles. A: presión y temperatura de la cámara. B: Humedad relativa del aire dentro de la cámara. C: Señal de backscattering. D: Señal de despolarización [13]..... | 19 |
| Figura 5. Estadística de las razones de despolarización obtenidas para diferentes tipos de aerosoles [13]. | 19 |
| Figura 6. Crecimiento higroscópico del cloruro de sodio al 74% de HR, observado en un microscopio electrónico de barrido [14]. | 20 |
| Figura 7. Aerosoles Marinos sobre Barbados [14]. | 20 |
| Figura 8. Perfil de temperatura de las capas de la atmósfera, <i>adaptada de</i> [25] [23] | 22 |
| Figura 9. a) Bacteria [28] [29], b) polen [9] [28], c) sal marina [10] [30], d) polvo sahariano [11] [31], e) partículas de hierro [12] [32]..... | 24 |
| Figura 10. Tipos de scattering en función de la longitud de onda y el radio de la partícula. Los tipos de moléculas y partículas típicas dentro de los rangos se muestran en el lado derecho Adaptada de [36]. | 27 |
| Figura 11. Sección transversal de extinción (derecha) y absorción (izquierda) a $\lambda = 628nm$ como función del parámetro de tamaño para seis tipos de partícula con formas irregulares y diferentes valores de índice de refracción. Adaptada de [40]. | 31 |
| Figura 12. Formas irregulares modeladas. Adaptada de [40]..... | 31 |
| Figura 13. Crecimiento de diferentes tipos de partícula en función de la humedad relativa..... | 32 |
| Figura 14. Influencia de la humedad relativa del aire en el índice de refracción de aerosoles. | 33 |
| Figura 15. Variación del factor dinámico de forma con la HR para diferentes tipos de aerosoles higroscópicos..... | 34 |
| Figura 16. Vector del campo eléctrico propagándose de forma circular a través del eje Z [47]..... | 35 |
| Figura 17. Campo eléctrico polarizado en el primer y tercer cuadrante [47]..... | 35 |
| Figura 18. Elipse de propagación del campo eléctrico [47]..... | 35 |
| Figura 19. Casos particulares de polarización elíptica, lineal y circular [15]. | 37 |
| Figura 20. Configuración óptica típica de un sistema Lidar. Adaptado de [9]..... | 40 |
| Figura 21. Configuración óptica de un sistema Lidar de despolarización. Adaptado de [9]..... | 41 |
| Figura 22. Partículas irregulares para modelos computacionales [64]..... | 44 |
| Figura 23. Sistema de humidificación por generación de burbujas [67]..... | 47 |
| Figura 24. Interfaz para la adquisición de datos..... | 48 |
| Figura 25. Caracterización del sistema de humedad control de humedad relativa. a) Proceso de humidificación, b) proceso de deshumidificación. Los dos procesos ocurren dentro de la cámara.. | 49 |

| | |
|--|----|
| Figura 26. Señal de control para humedad relativa con <i>setpoint</i> : 75% para temperatura del aire constate de $21,22^{\circ}\text{C} \pm 0,08$ | 49 |
| Figura 27. Caracterización del sistema de control de temperatura dentro de la cámara. | 50 |
| Figura 28. Química atmosférica en el Valle de Aburrá [71] | 51 |
| Figura 29. Fluidizador de aerosoles. a) esquema explicativo del proceso de fluidización; b) Fluidizador elaborado artesanalmente en vidrio soplado. | 52 |
| Figura 30. Distribución de tamaño de partícula a la salida del fluidizador para diferentes flujos de aire de entrada. | 53 |
| Figura 31. Interfaz de usuario realizada para la interpretación de los datos arrojados por el contador óptico de partículas. | 54 |
| Figura 32. Sistema reflector de recolección de backscattering | 55 |
| Figura 33. Sistema refractor de recolección de backscattering | 55 |
| Figura 34. Fotografía del montaje óptico de emisión y recolección de <i>backscattering</i> | 56 |
| Figura 35. Espectro del laser de onda continua Lasermate GMLN532-100FED..... | 57 |
| Figura 36. Análisis geométrico del sistema refractor de recolección de luz retroesparcida | 57 |
| Figura 37. Funcionamiento del diseño óptico del sistema de recolección de luz retroesparcida, a) Si el <i>scattering</i> se produce dentro de la cámara, b) si el <i>scattering</i> se produce entre L1 y la entrada de la cámara, c) si hay reflexiones en la cara posterior de la cámara. | 58 |
| Figura 38. Diatenuación por refracción respecto al ángulo de incidencia de la luz..... | 59 |
| Figura 39. Retardancia por refracción respecto al ángulo de incidencia de la luz | 59 |
| Figura 40. Diatenuación por reflexión respecto al ángulo de incidencia. | 60 |
| Figura 41. Retardancia por reflexión respecto al ángulo de incidencia de la luz | 60 |
| Figura 42. Despolarización en la pupila de salida del sistema | 61 |
| Figura 43. Montaje de polarizadores cruzados para determinar la despolarización en elementos ópticos usando una fuente de baja coherencia y amplio espectro. | 61 |
| Figura 44. Despolarización en lentes: a) Lente de Phywe, b) Lente de plástico, c) Lente LA1384-A-ML thorlabs 2” | 62 |
| Figura 45. Ubicación del calibrador (polarizador lineal) dentro del montaje óptico implementado. 62 | |
| Figura 46. Método de calibración para el cálculo de la razón lineal de despolarización volumétrica y de partículas. | 63 |
| Figura 47. Montaje experimental para la medición de la despolarización de partículas por <i>backscattering</i> | 64 |
| Figura 48. Proceso resumido para la obtención de la razón lineal de despolarización de aerosoles dentro de la cámara en condiciones de laboratorio. | 65 |
| Figura 49. Ruido electrónico para diferentes voltajes de alimentación..... | 68 |
| Figura 50. Ruido de fondo con láser encendido para diferentes voltajes de alimentación..... | 68 |
| Figura 51. Medidas de Ruido de fondo para diferentes días. | 69 |
| Figura 52. Procesamiento de señales. a) señales crudas, b) señales en el dominio de las frecuencias, c) señales filtradas usando la transformada de Fourier, y d) Señal de aerosoles, obtenida de la operación <i>señal filtrada – ruido de fondo</i> | 70 |
| Figura 53. Mediciones de calibración de las señales de backscattering para:..... | 71 |

| | |
|--|----|
| Figura 54. Gráficas de la evolución de la humedad relativa del aire (HR%), la concentración de partículas PM2.5 $\mu\text{g}/\text{cm}^3$, la señal de backscattering (V) y la razón lineal de despolarización volumétrica δv para aerosoles de carbonato de calcio CaCO_3 dentro de la cámara:..... | 73 |
| Figura 55. Fotografía SEM de las partículas de CaCO_3 | 74 |
| Figura 56. Dependencia lineal entre la concentración de partículas PM2.5 e Intensidad de luz retroesparcida por aerosoles de carbonato de calcio dentro de la cámara. | 75 |
| Figura 58. Gráficas comparativas entre humedad relativa del aire (HR%), concentración de partículas PM2.5 $\mu\text{g}/\text{cm}^3$, señal de backscattering (V) y razón lineal de despolarización volumétrica δv para aerosoles de carbonato de calcio CaCO_3 bajo condiciones de humedad relativa mayor a 60%. | 79 |
| Figura 59. Relación experimental entre la HR del aire y δv para aerosoles de CaCO_3 | 81 |
| Figura 60. Gráficas comparativas entre humedad relativa del aire (HR%), concentración de partículas PM2.5 $\mu\text{g}/\text{cm}^3$, señal de backscattering (V) y razón lineal de despolarización volumétrica para aerosoles de polvo del Sahara bajo condiciones de baja y alta HR. | 83 |

Lista de Tablas

| | |
|---|----|
| Tabla 1. Principales fuentes de aerosoles en la atmósfera [27] | 23 |
| Tabla 2. Modelos estadísticos de distribución de tamaño de partículas | 25 |
| Tabla 3. Bomba de vacío usada para la deshumidificación de la cámara | 47 |

| | |
|--|----|
| Tabla 4. Características técnicas del sistema óptico de recolección. | 56 |
| Tabla 5. Factor de calibración promedio para diferentes rangos de humedad relativa del aire | 72 |
| Tabla 6. Comparación entre distribución de tamaño de partículas, humedad relativa HR y δv para las mediciones de despolarización de la luz por partículas de $CaCO_3$ | 76 |
| Tabla 8. Comparación entre distribución de tamaño de partículas, humedad relativa y δv | 79 |
| Tabla 9. Parámetros de entrada para la simulación de bakscattering de aerosoles de $CaCO_3$ en MOPSMAP. | 81 |
| Tabla 10. Parámetros de salida para la simulación de bakscattering de aerosoles de $CaCO_3$ en MOPSMAP. | 82 |
| Tabla 11. Resultados de los experimentos con polvo del Sahara en el sistema de medida implementado en este trabajo. | 84 |
| Tabla 12. Parámetros de entrada para la simulación de scattering de aerosoles provenientes del desierto del Sahara. | 85 |
| Tabla 13. Resultados de la simulación de scattering con MOPSMAP para partículas de polvo del desierto del Sahara. | 85 |

Capítulo 1

INTRODUCCIÓN

El cambio climático [1] y la afectación en la calidad del aire [2] son problemáticas que atañen a Medellín, al Valle de Aburrá y al mundo de forma cada vez más contundente, y los aerosoles atmosféricos juegan un papel determinante. Por lo tanto, el primer paso para hacer frente a estos problemas incluye el estudio de las fuentes de emisión, las características físicas, químicas y ópticas de estas partículas. Entre los principales métodos de estudio de los aerosoles se encuentran los métodos *in situ*, que consisten en el análisis de muestras extraídas físicamente de atmósfera, y los métodos de teledetección, que utilizan instrumentos para recopilar la información sin tener contacto directo con ellos, como es el caso de los sistemas Lidar.

En los métodos de detección remota láser como, los sistemas Lidar, las características físicas de estas partículas se deducen a partir del análisis de las propiedades de la luz después interactuar con ellas. En este trabajo, la propiedad óptica de interés es la razón lineal de despolarización (LDR o δ), que proporciona información acerca de la forma de las partículas con el objetivo de rastrear las fuentes de emisión y de esta forma, apoyar la formulación de normativas gubernamentales medioambientales en el área de la contaminación atmosférica.

En la literatura se encuentra una gran variedad de reportes sobre los resultados de la aplicación de estos métodos para el estudio y caracterización de esta propiedad óptica de los aerosoles atmosféricos [3] [4] [5],, sin embargo, subsisten grandes incertidumbres asociadas principalmente a la falta de instrumentación que combine estos dos sistemas de medida (*in situ* y teledetección) de modo que se obtenga información de partículas en suspensión bajo condiciones controladas y conocidas que puedan ser comparadas con posteriores telemedidas en la atmósfera. El presente trabajo de investigación tiene como objetivo aportar en este aspecto con el desarrollo de un sistema de medida cuya función es determinar la razón lineal de despolarización de aerosoles bajo condiciones controladas de humedad relativa, y, conociendo el origen del aerosol bajo estudio, determinar la distribución de tamaño, la concentración de partículas y relación entre estas variables. Adicionalmente, se espera proveer una herramienta de investigación para, la caracterización óptica de aerosoles atmosféricos, los estudios de formación de las nubes, la detección de fuentes de emisión de contaminantes y apoyar experimentalmente la modelación matemática del *scattering* de aerosoles.

Finalmente, aunque este instrumento hace parte de la línea de Óptica Ambiental del Grupo de Óptica Aplicada de la Universidad EAFIT para el estudio de los aerosoles locales en el Valle de Aburrá-Antioquia (Colombia), se proyecta que pueda ser usado para el análisis de aerosoles generados en cualquier otra ciudad del país o de la región, así como también, se espera que este trabajo de investigación aporte en la precisión de las medidas e información obtenidas con un sistema Lidar.

1.1 Planteamiento del problema

El estudio de la calidad del aire y del cambio climático es una preocupación creciente tanto a nivel local como global y un papel decisivo en este aspecto lo cumplen los aerosoles. Para estudiar remotamente en la atmósfera sus propiedades físicas con alta resolución temporal y espacial son usados los instrumentos Lidar que involucran un láser pulsado que emite luz desde la tierra hacia la atmósfera. Estos se usan con el fin de identificar las fuentes de emisión de los aerosoles y el impacto de estos tanto a nivel local, como por ejemplo en el ciclo de lluvias, la formación de nubes y la calidad de aire, como a nivel global, en el equilibrio radiativo de la tierra, fundamental para la comprensión del cambio climático.

Las propiedades físicas mencionadas anteriormente incluyen la composición química, el tamaño y la forma, y pueden determinarse a través de la medición de las propiedades ópticas resultantes de la interacción de la luz con la atmósfera. Un tipo de Lidar llamado Lidar de despolarización, es de particular interés en este trabajo debido a que proporciona información de la forma del aerosol, un parámetro crucial para la identificación de las fuentes de emisión. Los sistemas Lidar utilizan como principio físico de medida el cambio del estado de polarización de la luz incidente sobre una partícula en función de la forma del esparsor, por tanto, el estudio de la despolarización lineal del haz esparcido, puede dar información sobre el tipo de partícula con la que interactuó la radiación, y por tanto, información para la caracterización óptica de los aerosoles.

Normalmente la determinación de estas características se ha realizado utilizando observaciones de teledetección directamente en la atmósfera o a través de instrumentos *in situ*, que en conjunto con simulaciones computacionales proveen la información requerida, sin embargo, existe poca evidencia en la literatura de instrumentos integrales que proporcionen de forma simultánea los resultados de las medidas *in situ* y de detección remota para la despolarización de la luz por partículas. La solución propuesta en este trabajo de investigación se basa en la implementación de un instrumento de laboratorio de naturaleza *in situ* que utiliza el principio físico de la instrumentación remota, haciendo posible el estudio de propiedades ópticas de los aerosoles atmosféricos locales, particularmente de la despolarización lineal bajo ambientes controlados de humedad relativa del aire, de modo que pueda proveer valores de referencia para posteriores medidas Lidar en la ciudad.

1.2 Objetivos

1.2.1 General

Implementar un sistema de medición para obtener valores de razón lineal de despolarización de aerosoles atmosféricos bajo condiciones controladas en el laboratorio.

1.2.2 Específicos

1. Revisar el estado de arte de la despolarización de la luz debido a aerosoles atmosféricos y sus métodos de medida.
2. Implementar un sistema de control de la humedad relativa y temperatura del aire dentro de un volumen definido (cámara).
3. Poner a punto un sistema de inyección de aerosoles para la cámara.
4. Implementar un sistema óptico de emisión y recolección de la luz retroesparcida, y analizar y corregir sus efectos en la señal de despolarización.
5. Obtener valores de la razón lineal de despolarización de los aerosoles inyectados a la cámara.
8. Determinar la influencia de la humedad relativa del medio sobre la despolarización de la luz debido a aerosoles en las condiciones controladas de laboratorio.

1.3 Estado del arte

A continuación, se describe sintéticamente la revisión bibliográfica en la que se ilustran resultados significativos sobre los sistemas de despolarización Lidar y los desarrollos en condiciones de laboratorio, para caracterizar la despolarización de la luz debido a los aerosoles atmosféricos. Además, se muestra evidencia del efecto de variables atmosféricas como la humedad relativa del aire en la despolarización de la luz. También, se hace referencia a los trabajos realizados usando modelos teóricos y métodos computacionales para predecir propiedades ópticas debido al *scattering* de pequeñas partículas y cómo estos han sido usados para predecir la razón lineal de despolarización de aerosoles.

Entre los instrumentos de detección remota para el estudio de los aerosoles se encuentran los fotómetros solares [6], instrumentos pasivos que detectan el efecto sobre la presencia de aerosoles midiendo la radiación generada por fuentes naturales como la luz solar, y los sistemas Lidar, instrumentos activos que usan uno o varios láseres de alta potencia como fuente de emisión y recolectan la luz generada por retroesparcimiento o *backscattering* debido a los aerosoles atmosféricos. Con los sistemas Lidar es posible medir propiedades ópticas de los aerosoles, que dan información acerca de sus características físicas. Como describe C. Chung [7] estas propiedades son: el espesor óptico de aerosoles, que da información de la concentración, el exponente de Ångstrom, relacionado con el tamaño, el albedo de esparcimiento simple o *Single scattering Albedo* que permite identificar partículas absorbentes, y la razón lineal de despolarización, que da información de la forma y el tipo de aerosol.

El instrumento Lidar especializado en la determinación de la despolarización de la luz debido a los aerosoles es conocido como Lidar de despolarización, cuya particularidad radica en el uso de un divisor de haz que separa las componentes ortogonales de la luz recolectada antes de ser detectadas por los fotosensores. Uno de los Lidar de despolarización más emblemáticos es conocido como CALIPSO (*Cloud-Aerosol Lidar and Infrared Pathfinder Satellite Observations*), un satélite artificial de la NASA (*National Aeronautics and Space Administration*) y del CNES (National Centre for Space Studies from France) dedicado a realizar observaciones de alta resolución de los aerosoles de la atmósfera superior utilizando un telescopio de un metro de diámetro y equipado con un Lidar de despolarización y un radiómetro infrarrojo.

En Z. Liu et al. [8], M. Hayman et al. [9] y Z. Liu et al. [10] se presenta el seguimiento de las nubes de polvo generadas en el Sahara y que se transportaron hasta el golfo de México en el 2017. Los datos registrados por el Lidar CALIPSO, proporcionan información con alta resolución temporal y espacial del evento sahariano, además de discriminar este tipo de aerosol de otros presentes en las mediciones como la biomasa producida por incendios en África y los aerosoles de sal marina presentes en el océano Atlántico, gracias a la conocida señal de despolarización que estos producen. En la Figura 1 se ilustra los datos tomados por el Lidar CALIPSO desde el 17 hasta el 28 de agosto de 2017. Las líneas rojas representan las

trayectorias de transporte del polvo y los perfiles verticales indican el coeficiente de retroesparcimiento a 532 nm. La letra D designa la capa de polvo y la letra S representa la quema de biomasa.

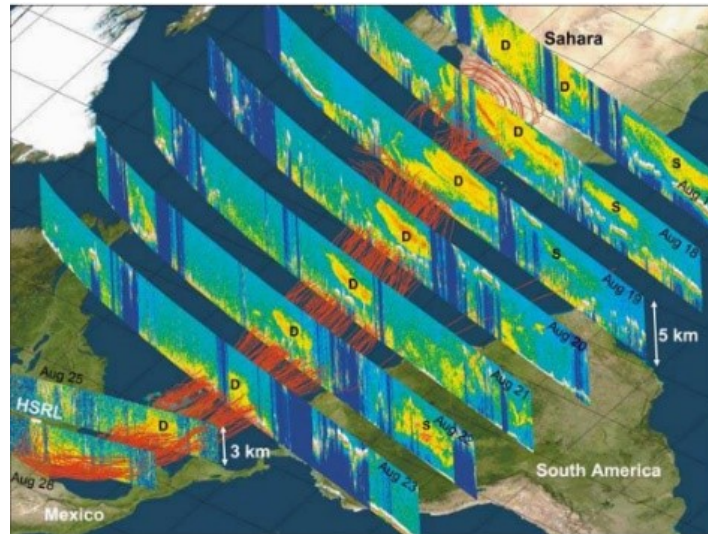
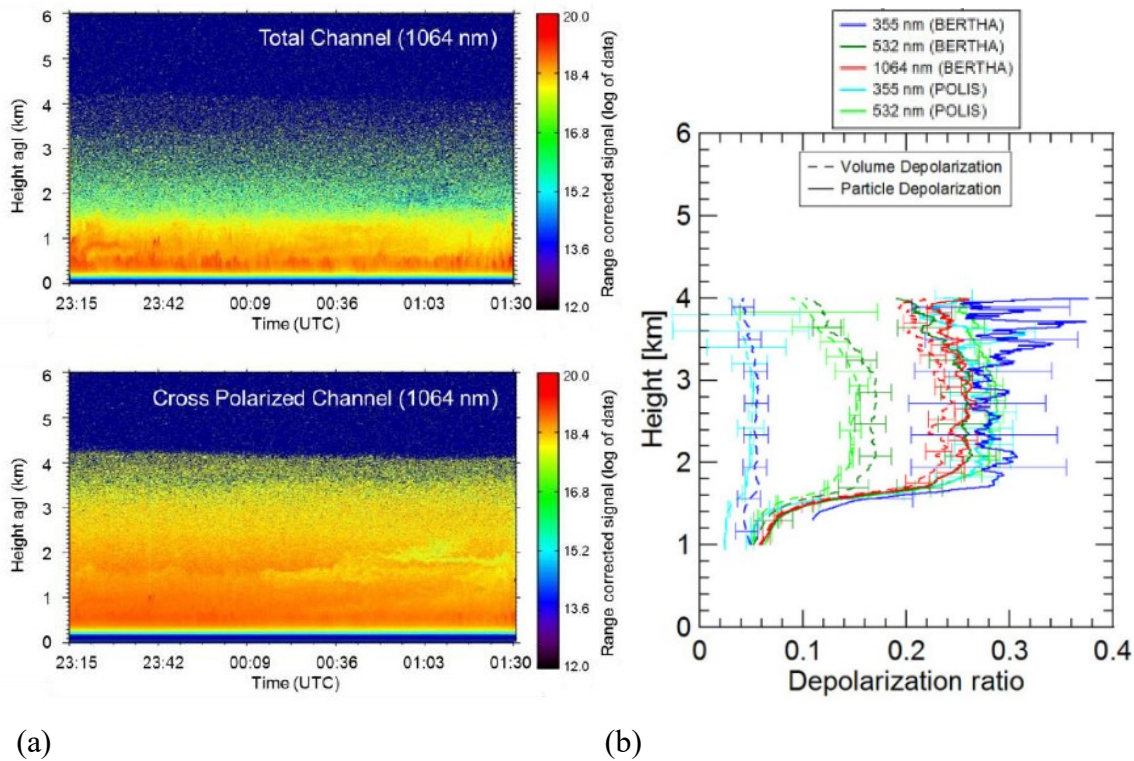


Figura 1. Nubes de polvo producidas en el desierto del Sahara el 17 de agosto del 2017 y transportadas hasta el Golfo de México. [9]

Para ilustrar el factor diferencial del uso del Lidar de despolarización versus sistemas Lidar convencionales se muestra la Figura 2 [11], en la parte superior de la Figura 2a, la señal rango-correctada entregada por el canal 1064nm del Lidar proporciona información de la intensidad de *backscattering* debido a aerosoles indicando la presencia de ellos hasta los 4.1 km, al comparar estos resultados con la señal entregada por el canal de despolarización en 1064nm (parte inferior de la Figura 2a), se observa que a partir de 1.8 km, una señal de alta intensidad correspondiente con la componente perpendicular del campo esparcido indica que las partículas en ese rango son altamente asimétricas, como es el caso del polvo desértico. Por otro lado, en la Figura 2b se muestra la dependencia del grado de despolarización con la longitud de onda a partir de la medición de dos sistemas Lidar, ampliamente conocidos, BERTHA [12] y POLIS [13] para garantizar la calibración de los sistemas y la fiabilidad de las medidas.



(a)

(b)

Figura 2. Medida de la razón lineal de despolarización de polvo desértico para tres longitudes de onda sobre Barbados 30 de junio e 2013. (a) Parte superior: señal rango corregida para 1064nm. Parte inferior: canal de despolarización para 1064nm. (b) Perfiles verticales de despolarización para [11].

En las medidas de despolarización de la luz con Lidar, uno de los factores que influyen más fuertemente en la fiabilidad de las medidas es la calibración del sistema. Para esto es muy importante contar con una atmósfera estable y unas consideraciones sobre la alineación y la disposición de la óptica de emisión, recolección y detección. Respecto a esto, se han publicado diferentes metodologías para disminuir las incertidumbres en los valores de despolarización arrojados por las mediciones, y entre las que destacan el método Delta90 introducido por Volker Freudenthaler [14] y otros métodos similares presentados autores [15] y [16].

Sin embargo, obtener medidas de la despolarización y otras propiedades ópticas de muchos tipos de aerosoles es complejo, ya que es difícil encontrar la presencia única de un único tipo de aerosol en la atmósfera. Por eso, se han encontrado dos trabajos que intentan resolver este problema, construyendo cámaras de aerosoles que permiten caracterizar ópticamente los aerosoles bajo ambientes controlados, superando los problemas de calibración por una atmósfera poco estable y conociendo con certeza la muestra que se caracteriza. El primero de estos trabajos fue presentado por Tetsu Sakai et al. [17], en el que se mide la razón lineal de despolarización por *backscattering* de distintos aerosoles como polvo del Sahara, sal

marina y sulfato de amonio, usando una cámara de laboratorio. En la Figura 3 se ilustra la cámara usada para las mediciones, cuyas principales componentes son: bombas de aire limpio para garantizar un espacio libre de aerosoles, un atomizador para la inyección de aerosoles conocidos, un impactador que permite recolectar muestras de elementos en la cámara y un contador óptico de partículas para medir la concentración y distribución de tamaño de las partículas dentro de la cámara. Además, cuenta con un láser de 532 nm, con un telescopio refractor que recolecta la señal de *scattering* dentro de la cámara, un divisor de haz de polarización (PBS) que divide las componentes paralela y perpendicular del campo eléctrico, tubos fotomultiplicadores para amplificar la señal y un osciloscopio para la lectura de la señal final. Usando este montaje experimental se obtuvieron los siguientes valores: 0.39 para el polvo desértico, 0.04 para los cristales de sulfato de amonio y 0.08 para los cristales de sal marina.

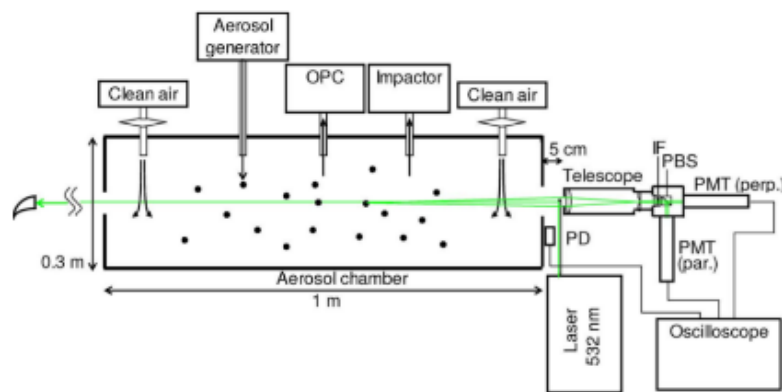


Figura 3. Esquema del Sistema de medida de la despolarización de aerosoles. [17]

El segundo trabajo fue realizado por E. Järvinen y O. Kempainen et al. [18], para estudiar las propiedades de despolarización de los aerosoles utilizando una cámara de 84 m^3 , con control de temperatura y humedad relativa del aire, para medir la influencia de las variables atmosféricas en los valores de despolarización. La Figura 4 presenta las condiciones experimentales de humedad relativa, presión y temperatura (Panel A y panel B) y el panel C y D, muestra cómo varía la señal de backscattering y la razón de despolarización respectivamente. La Figura 5 muestra las medidas de despolarización obtenidas para diferentes tipos de aerosoles.

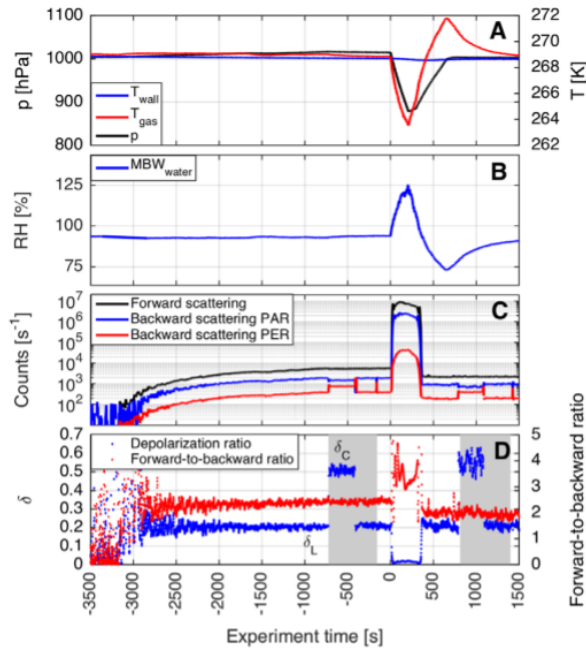


Figura 4. Condiciones experimentales para la caracterización óptica de aerosoles. A: presión y temperatura de la cámara. B: Humedad relativa del aire dentro de la cámara. C: Señal de backscattering. D: Señal de despolarización [18]

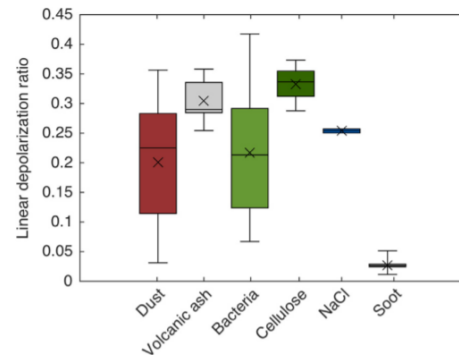


Figura 5. Estadística de las razones de despolarización obtenidas para diferentes tipos de aerosoles [18].

La despolarización debido al *scattering* de los aerosoles se debe tanto a variables intrínsecas de la partícula como el índice de refracción, la forma y el tamaño, como también a variables atmosféricas como la humedad relativa del aire, según lo han demostrado estudios recientes. Por ejemplo, Haarig et al. [19] demostraron la dependencia de las propiedades ópticas de los aerosoles de sal marina con la humedad relativa. La Figura 6 muestra el crecimiento higroscópico del aerosol de cloruro de sodio, en presencia de humedad relativa superior al 75% y en la Figura 7 se muestra cómo cambios en la humedad relativa inciden en la medida de despolarización. La Figura 7a muestra la señal de intensidad de *backscattering* indicando presencia de aerosoles hasta los 2.1 km aproximadamente, la Figura 7c muestra que la humedad relativa decae del 80 al 40% entre 0.8 y 2.0 km y la Figura 7b muestra cómo esta caída en la humedad relativa se refleja en una disminución de la razón de despolarización de los aerosoles de sal marina presentes.

Una forma de comparar y verificar los resultados experimentales es usando métodos computacionales. Para predecir el scattering de partículas, se reportan en la literatura básicamente cuatro métodos computacionales llamados Mie [20], T-Matrix [21] [22], DDA [23] (Discrete Dipole Approximation) e IGOM [24] (Improved geometric optics method). El

cálculo de Mie supone partículas esféricas y alberga desde el scattering Rayleigh hasta el scattering óptico, pero no puede calcular propiedades ópticas que se derivan de la no esfericidad de las partículas.

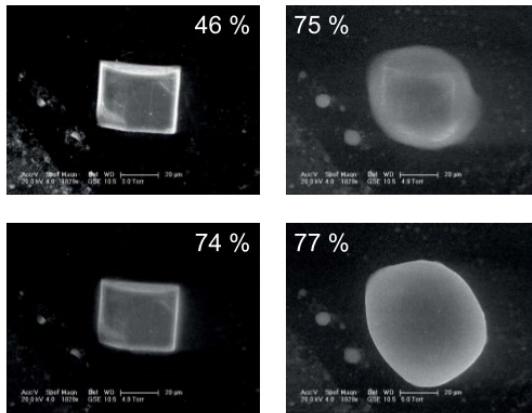


Figura 6. Crecimiento higroscópico del cloruro de sodio al 74% de HR, observado en un microscopio electrónico de barrido [19].

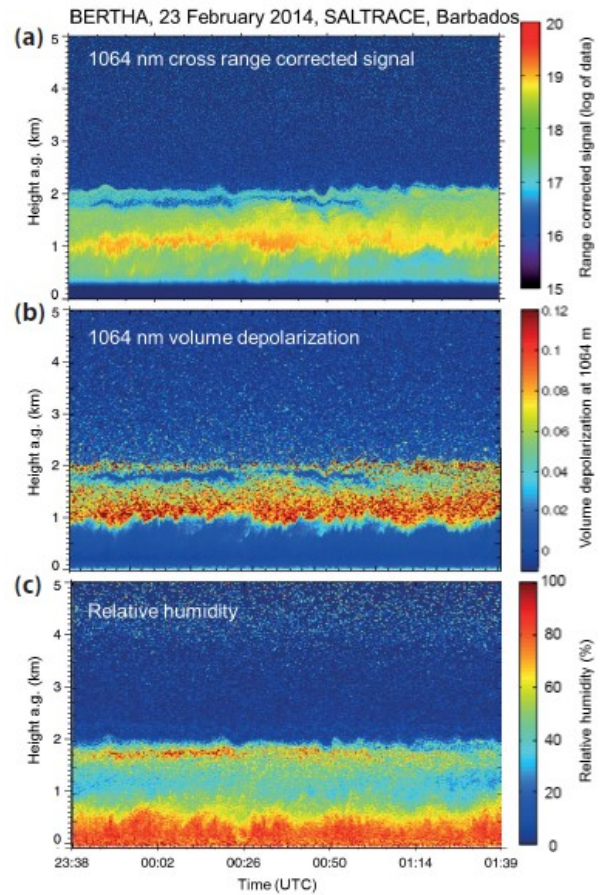


Figura 7. Aerosoles Marinos sobre Barbados [19].

El algoritmo T-Matrix permite realizar cálculos para partículas no esféricas, como esferoides, cilindros y partículas Chevichev, pero tiene limitaciones en el parámetro de tamaño de estas y no permite partículas completamente asimétricas. Por otro lado, el algoritmo DDA, admite partículas con formas aleatorias, pero requiere muchos recursos computacionales que aumentan con el número de partículas y el parámetro de tamaño, y finalmente IGOM es un algoritmo aplicado en el *scattering* geométrico y admite sólo partículas con simetría esférica. Un trabajo reciente, publicado en el 2018 [25], presenta un programa de acceso libre llamado MOPSMAP, que recoge las fortalezas de estos algoritmos en uno solo, convirtiendo este *software* en una herramienta de gran potencial para la verificación y la predicción de resultados.

Capítulo 2

FUNDAMENTOS

En este capítulo se describen las definiciones y modelos teóricos necesarios para entender el problema de investigación que aborda este trabajo: Determinar experimentalmente valores de despolarización de partículas de aerosol en condiciones controladas de laboratorio que puedan utilizarse posteriormente como valores de referencia para las mediciones Lidar de despolarización que se realizarán en el Valle de Aburrá.

2.1 La atmósfera

La atmósfera terrestre es la capa gaseosa que rodea el planeta y que cumple la función de transferir energía entre el Sol, la Tierra y el espacio exterior; entre sus componentes predominan el nitrógeno y el oxígeno, que constituyen el 99% de su volumen total [26], mientras que en el 1% restante se encuentran constituyentes menores que cumplen un rol crucial en la dinámica atmosférica, como es el caso del dióxido de carbono (CO_2), el vapor de agua, el ozono (O_3) y los aerosoles. La atmósfera está estratificada verticalmente de acuerdo con la variación de la temperatura [27], en la Figura 8 se muestran los valores idealizados de temperatura respecto a la altitud de acuerdo con los acuerdos internacionales de atmósfera estándar [28].

La primera capa de la atmósfera terrestre, llamada tropósfera [29] tiene una altura promedio de 18 km en los trópicos, 17 km en lugares de latitud media y de 6,0 km en las regiones polares en invierno, es decir, depende de la latitud y de la estación del año. Esta capa es definida por una disminución lineal de la temperatura como función de la altitud (Figura 8) y debido al balance hidrostático, contiene el 90% del volumen de gases de la atmósfera. En esta capa ocurren todos los fenómenos del tiempo meteorológico como la lluvia, los ciclones, huracanes, el arcoíris, etc. Desde el límite superior de la tropósfera hasta los 50 km la temperatura aumenta con la altitud, esta sección de la atmósfera es llamada estratósfera y está delimitada por la estratopausa. Las moléculas de ozono O_3 se producen en esta capa debido

a la interacción de la luz UV con las moléculas de O_2 protegiendo la biosfera de esta radiación de alta energía. Desde la estratopausa hasta los 85-90 km se encuentra la mesósfera, en la cual hay de nuevo una disminución de la temperatura y tiene como límite la mesopausa. Sobre la mesopausa se encuentra la termósfera, caracterizada por el incremento en la temperatura, el aire es tan escaso en esta capa que la suposición de un fluido continuo falla y los efectos de la ionización son cruciales para explicar su comportamiento. Sabiendo que la presión es proporcional a la masa de aire sobre cada capa, el 90% de la masa atmosférica se encuentra en la tropósfera, un poco menos del 10% en la estratósfera y solo cerca del 0.1% en la mesosfera y termósfera, de allí el interés para la caracterización completa de los componentes en la tropósfera.

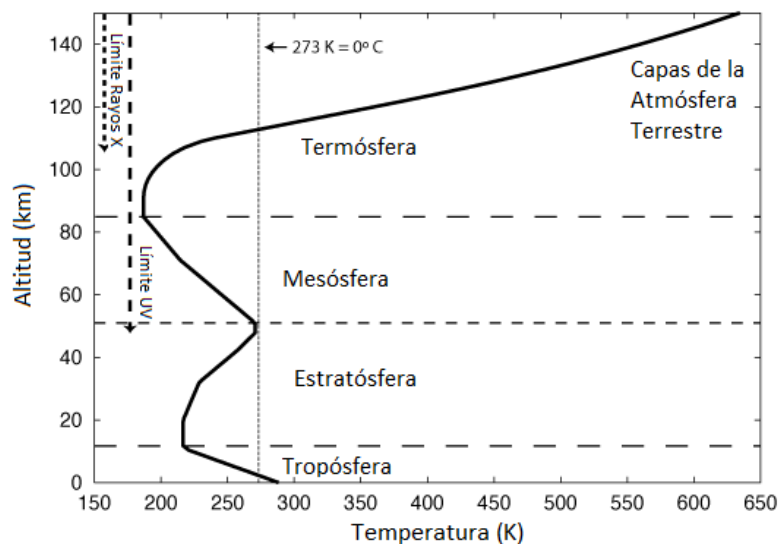


Figura 8. Perfil de temperatura de las capas de la atmósfera, *adaptada de* [30] [28]

2.2 Aerosoles atmosféricos

Los aerosoles atmosféricos son suspensiones de partículas sólidas y/o líquidas en el aire producidas tanto por procesos naturales como antropogénicos. Su diámetro típico varía desde unos pocos nanómetros hasta unas decenas de micras, y su composición y forma dependen de su origen. Adicionalmente, teniendo en cuenta el proceso de formación, se clasifican en primarios y secundarios, dependiendo de si son emitidos directamente a la atmósfera o son formados en la atmósfera por reacciones químicas o fotoquímicas.

El estudio de las propiedades físicas y químicas de los aerosoles es determinante debido a su impacto en la calidad del aire y, por tanto, en la salud humana como en los ecosistemas del planeta. Por otro lado, los aerosoles cumplen un papel muy importante en el cambio climático [31] ya que interactúan fuertemente con la radiación que entra a la tierra y la que sale de ella.

La primera forma en la que interactúan con la radiación es de forma directa, es decir, los aerosoles esparcen y absorben la radiación causando cambios en el albedo terrestre y así, influye en el calentamiento o enfriamiento de la superficie terrestre. El segundo efecto es indirecto y se refiere a que muchos aerosoles tienen la capacidad de acumular vapor de agua (es decir, son higroscópicos) interviniendo en la formación de nubes y además en el cambio de sus propiedades físicas y radiativas.

Las principales concentraciones de aerosoles en la atmósfera se resumen en la Tabla 1 [32], en la cual se especifica la fuente, el tipo de aerosol y su concentración en la atmósfera, en Teragramos por año. Como se observa en la tabla, la mayor concentración de aerosoles proviene de fuentes naturales, principalmente sal marina y polvo desértico, mientras que cerca del 10% es de origen antropogénico, cuyas fuentes principales son fábricas, quema de combustibles y agricultura intensiva.

Tabla 1. Principales fuentes de aerosoles en la atmósfera [32]

| Fuente | Tipo de aerosol | Concentración (Tg/año) |
|----------------------------------|---|---------------------------|
| Océanos | Sal marina: NaCl (cloruro de sodio), KCl (cloruro de potasio), CaSO ₄ (sulfato de calcio), y (NH ₄) ₂ SO ₄ (sulfato de amonio) | ~1000 – 2000 |
| Corteza terrestre y criósfera | Polvo desértico y cristales de hielo | ~2000 |
| Biósfera y quema de biomasa | De la biósfera se producen partículas orgánicas, polen, microorganismos y esporas. De la quema de biomasa se produce principalmente hollín y cenizas (carbón elemental) | ~450 |
| Volcanes | Silicatos y óxidos metálicos y gases como dióxido de sulfuro | ~15 – 90 |
| Conversión de gases a partículas | Por ejemplo, el dióxido de sulfuro es convertido a través de una serie de reacciones químicas en ácido sulfúrico | ~1300 |
| Extraterrestre | Polvo interplanetario | ~10 |

Las propiedades microfísicas de los aerosoles atmosféricos se describen a través de su forma, tamaño y composición química. En cuanto a la forma ésta depende de la fuente, algunos ejemplos de formas muy características entre estas partículas son el polen, las bacterias, la sal marina, el polvo sahariano y las partículas esféricas como las gotas de agua o hierro. En la Figura 9 se presenta la forma de algunos de estos aerosoles observadas usando microscopía electrónica de barrido.

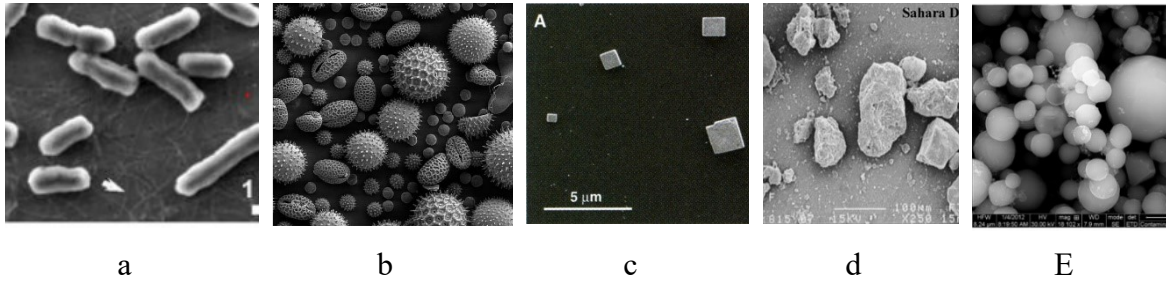


Figura 9. a) Bacteria [33] [34], b) polen [9] [33], c) sal marina [10] [35], d) polvo sahariano [11] [36], e) partículas de hierro [12] [37]

La forma de la partícula se modela matemáticamente utilizando los esferoides o elipsoides de revolución, que se representan mediante la relación axial ϵ_m [25] [20], es decir, la relación entre la longitud del eje perpendicular al eje de rotación y la longitud del eje de rotación. Esferoides con $\epsilon_m < 1$ son llamados prolatos (elongados) y esferoides con $\epsilon_m > 1$ son llamadas oblatos (aplanados). De forma similar se define la relación de aspecto ϵ' como la razón entre el eje mayor y el eje menor. En el caso de esferoides prolatos $\epsilon' = \frac{1}{\epsilon_m}$, y en el caso de esferoides oblatos $\epsilon' = \epsilon_m$, mientras que esferoides con $\epsilon' = 1$ son esferas.

En cuanto al tamaño de la partícula, éste se define a través del radio o diámetro para partículas esféricas o utilizando el tamaño de una esfera equivalente para partículas no esféricas [25]. El radio de esfera equivalente, r_v en μm , de una partícula con volumen V conocido está dado por:

$$r_v = \sqrt[3]{\frac{3V}{4\pi}} \quad (1)$$

Mientras que la sección transversal geométrica promedio de una partícula, expresada en μm , se define como muestra la Ecuación (2),

$$r_c = \frac{\sqrt{C_{geo}}}{\pi} \quad (2)$$

donde C_{geo} es la sección transversal geométrica promedio y r_c es igual al radio de una esfera con la misma superficie en el caso de los esferoides. La razón adimensional, entre r_c y r_v representa la desviación de la forma de la partícula de una forma esférica. Así, combinando las ecuaciones (1) y (2) se obtiene el factor de conversión de radios (ξ_{vc}):

$$\xi_{vc} = \frac{r_v}{r_c} = \sqrt[3]{\frac{3\sqrt{\pi}}{4} \frac{V}{C_{geo}^{3/2}}} \quad (3)$$

Otra manera de describir el tamaño de partículas no esféricas es a través del radio efectivo, dado en μm , y definido como:

$$r_{vcr} = \frac{3V}{4C_{geo}} = \xi_{vc}^3 r_c \quad (4)$$

Por último, el factor de forma dinámico χ (*dynamic shape factor*) describe la desviación de la forma esférica, que tomando en cuenta las propiedades dinámicas de una partícula no esférica, describe también la relación entre la fuerza de arrastre de la partícula respecto a la fuerza de arrastre experimentada por una partícula esférica de volumen equivalente, es decir:

$$\chi = \frac{r_p}{r_v} \quad (5)$$

donde r_p es el radio de la partícula y r_v es el radio de esfera equivalente [38].

El tamaño (r) de las partículas en la atmósfera no es uniforme, por ello existen diferentes modelos estadísticos que permiten describir cuantitativamente la distribución de los diversos tamaños $N(r)$. Estos modelos representan la cantidad de partículas en cada uno de los rangos de tamaño y los más utilizados se muestran en la Tabla 2 [23].

Tabla 2. Modelos estadísticos de distribución de tamaño de partículas

| Tipo | Nombre | Función matemática |
|-------------|-------------------------------|--|
| Normalizada | Distribución Log-normal | $N(r) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \frac{N_0}{\ln\sigma} \frac{1}{r} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln r - \ln r_{mod}}{\ln\sigma}\right)^2\right]$ (6) |
| Potencial | Ley de Junge | $N(r) = Ar^\eta, B = 0$ (7) |
| Gamma | Distribución gamma modificada | $N(r) = Ar^\eta \exp(-Br^\gamma)$ (8) |
| | Distribución gamma | $N(r) = Ar^\eta \exp(-Br), \gamma = 1$ (9) |
| | Distribución exponencial | $N(r) = A \exp(-Br), \eta = 0, \gamma = 1$ (10) |

En el modelo normalizado, r_{mod} es el radio modal o el radio medio geométrico, σ es el ancho de la distribución o desviación estándar geométrica, N_0 es la densidad total de partículas. Para la distribución potencial, A es una constante que depende del número de partículas por centímetro cúbico y el exponente η , determina la pendiente de la curva de la distribución, a medida que su valor disminuye, el número de partículas más grandes aumenta en comparación con el número de partículas más pequeñas. En las distribuciones gamma, A , η , B y γ son constantes positivas que dependen unas de otras. La distribución gamma es ampliamente adaptable a condiciones de neblina, nubes y lluvia, por los cuatro parámetros ajustables. Sin embargo, mientras que la pendiente en la ley de potencia de Junge a menudo se correlaciona con el comportamiento de la extinción de radiación por los aerosoles, las funciones de distribución Gamma no son muy utilizadas porque no es claro el significado físico de los parámetros empíricos ajustables [39].

Para determinar el tamaño aparente de una partícula, es decir, el tamaño relativo de esta respecto a la longitud de onda de la luz, se usa el parámetro de tamaño x adimensional, descrito matemáticamente como sigue [20]:

$$x = \frac{2\pi r_s}{\lambda} \quad (11)$$

donde r_s es el radio de una esfera con superficie equivalente a la partícula y λ es la longitud de onda de la luz incidente en la partícula. Análogamente, existen parámetros de tamaño teniendo en cuenta el radio efectivo y el radio equivalente, se encuentran simplemente reemplazando las ecuaciones (2) y (4) en la ecuación (11)

Finalmente, la composición química de una partícula determina su índice de refracción complejo, m , dependiente de la longitud de onda. La parte imaginaria n_i del índice de refracción está relacionado con la capacidad de absorción de la luz dentro de la partícula. Así pues, partículas no absorbentes no tienen parte imaginaria; mientras que la parte real n indica la velocidad de fase dentro de la partícula, relacionado con el fenómeno de esparcimiento de la luz [40].

$$m = n - n_i \quad (12)$$

2.2.1 Interacción luz-partícula: propiedades ópticas de los aerosoles

La interacción de los aerosoles con la radiación produce diferentes efectos que pueden describirse en términos generales como sigue: El primero, cuando la partícula absorbe la energía del fotón y la convierte en energía térmica se denomina *absorción*. El segundo, cuando la partícula reemite el fotón absorbido con la misma frecuencia de la energía incidente, pero en diferentes direcciones, se define como *scattering* elástico o esparcimiento elástico; efecto que además conduce a cambios en la polarización de la radiación en función de la dirección del esparcimiento. Finalmente, si el fotón reemitido tiene una energía distinta a la energía incidente, el *scattering* producido se denomina inelástico o *scattering* Raman. Particularmente, cuando la dirección de propagación del *scattering* se da en la misma dirección de incidencia de la radiación es denominado *backscattering* o retroesparcimiento. Por otra parte, se define la extinción de la radiación como la disminución en su energía al viajar por un medio debido a los procesos de *scattering* y absorción, es decir:

$$\text{Extinción} = \text{Scattering} + \text{absorción} \quad (13)$$

En un medio con absorción nula o con un muy bajo efecto sobre la energía de la radiación, entonces:

$$\text{Extinción} = \text{Scattering} \quad (14)$$

En los términos formales del electromagnetismo, la interacción luz-partícula elástica se explica considerando un campo electromagnético que oscila en un plano y que hace que las

cargas de las partículas con las que interactúa se excitan a esa misma frecuencia, reemitiendo ondas secundarias. La superposición de estas ondas secundarias produce el campo elástico esparcido. Si las cargas no oscilan exactamente en la misma frecuencia de la onda incidente se produce disipación de la energía dentro de la partícula, es decir, ocurre absorción.

Entender el *scattering* como la superposición de ondas secundarias producidas por las cargas en una partícula complejiza los cálculos a un nivel impráctico para el alcance de este trabajo. Por ello se utiliza el concepto dentro del electromagnetismo macroscópico, distinguiendo tres aproximaciones válidas para el *scattering* de acuerdo con el parámetro de tamaño de la partícula (x), denominados: Rayleigh, Mie y *scattering* óptico. El *scattering* Rayleigh se produce cuando el tamaño de la partícula es mucho menor comparado con la longitud de onda de los fotones incidentes. El *scattering* Mie predomina con partículas de tamaños comparables con la longitud de onda y el *scattering* óptico se produce cuando la partícula es mucho más grande que la longitud de onda. El parámetro de tamaño y tipo de *scattering* como función de la longitud de onda y el radio de la partícula se muestran en la Figura 10 .

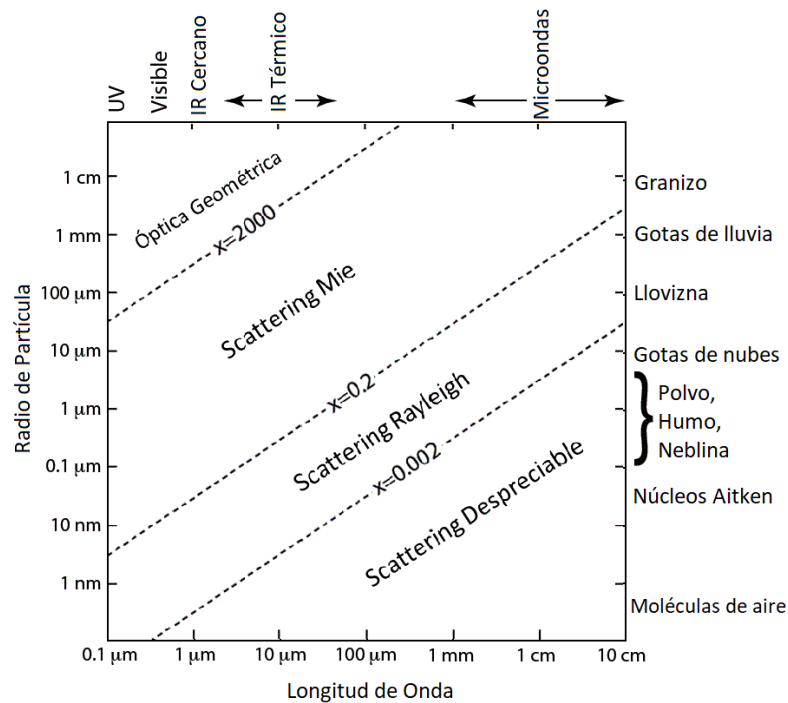


Figura 10. Tipos de *scattering* en función de la longitud de onda y el radio de la partícula. Los tipos de moléculas y partículas típicas dentro de los rangos se muestran en el lado derecho Adaptada de [41].

En general la interacción radiación - aerosol en la atmósfera se describe utilizando la conocida ley de *Beer-Lambert-Bouger*, que establece la relación entre la atenuación de la radiación con las propiedades del medio a través del cual viaja la radiación (la atmósfera en este caso) [42], como se muestra en la siguiente expresión:

$$T(z, \lambda) = e^{-\int_0^z \alpha(z', \lambda) dz'} \quad (\text{Ley de Beer-Lambert-Bouger}) \quad (15)$$

donde $T(z, \lambda)$ es la transmitancia en función de la altura z respecto a la superficie de la Tierra y de λ , la longitud de onda de interés, $\alpha(z', \lambda)$ es el coeficiente de extinción total de la radiación que tiene en cuenta la absorción y el *scattering* producido tanto por las partículas como por las moléculas atmosféricas.

El régimen bajo el cual se enmarca este trabajo es el *scattering* Mie, que al aplicarse a aerosoles atmosféricos requiere que las partículas estén suficientemente separadas de tal forma que las interacciones de cada una de ellas con la radiación puedan modelarse independientemente. La teoría de Mie es una solución completamente analítica de las ecuaciones de Maxwell que describe el *scattering* de una onda electromagnética plana sobre una esfera homogénea, a través de los coeficientes de eficiencia de extinción Q_e , de *scattering* Q_s y de absorción Q_a de las partículas. Estas eficiencias se definen como la razón entre la sección transversal del respectivo proceso C_i y la sección transversal geométrica de la partícula, es decir:

$$Q_i = \frac{C_i}{\pi r^2} \quad (16)$$

donde r es el radio de la partícula y la sección transversal C_i se define como la "superficie" de la partícula que interactúa con la radiación en un plano perpendicular a la dirección de propagación, midiendo así el grado de interacción de la partícula con la radiación. Teniendo en cuenta la definición de la Ecuación 13, la eficiencia de extinción está dada por:

$$Q_{ext} = Q_{sca} + Q_{abs} \quad (17)$$

Formalmente, los coeficientes de eficiencia de *scattering* y extinción se calculan integrando el vector de Poynting, expresado en términos de las expansiones de los campos eléctrico y magnético, respecto a las variables angulares y espaciales. En [43] [44] [40] se encuentra el procedimiento detallado para obtener estos coeficientes de eficiencia de la forma que muestran las ecuaciones (18)(19).

$$Q_{sca} = \frac{2\pi}{x^2} \sum_{n=1}^{\infty} (2n+1)(|a_n|^2 + |b_n|^2) \quad (18)$$

$$Q_{ext} = \frac{2\pi}{x^2} \sum_{n=1}^{\infty} (2n+1) \text{Re}(a_n + b_n) \quad (19)$$

donde x es el parámetro de tamaño de la partícula y, a_n y b_n son números complejos llamados coeficientes Mie que dependen de las propiedades físicas de las partículas y se definen como muestra la ecuación (20).

$$\begin{aligned}
a_n &= \frac{m^2 j_n[(mx)[xj_n(x)]' - \mu_1 j_n(x)[mxj_n(mx)]']}{m^2 j_n[(mx)[xh_n^1(x)]' - \mu_1 h_n^1(x)[mxj_n(mx)]']} \\
b_n &= \frac{\mu_1 j_n(mx)[xj_n(x)]' - j_n(x)[mxj_n(mx)]'}{\mu_1 j_n(mx)[xh_n^1(x)]' - h_n^1(x)[mxj_n(mx)]'}
\end{aligned} \tag{20}$$

donde m es el índice de refracción de la esfera relativa al medio, x el parámetro de tamaño, k el número de onda, μ_1 la permeabilidad magnética del ambiente, j_n y $h_n^{(1)}$ son funciones esféricas.

Conociendo las secciones transversales de los diferentes procesos de interacción luz-partícula C_i , se define el coeficiente de extinción total $\alpha(z, \lambda)$ para cualquier posición z dentro del medio, como sigue:

$$\alpha(z, \lambda) = \sum_j N_j(z) [C_{j,abs}(\lambda) + C_{j,sca}(\lambda)] \tag{21}$$

La sumatoria se extiende sobre todos los tipos de constituyentes atmosféricos y N_j es la concentración numérica del constituyente j .

Finalmente, el coeficiente de retroesparcimiento total $\beta(z, \lambda)$ se define como:

$$\beta(z, \lambda) = \sum_j N_j(z) \frac{dC_{j,sca}}{d\Omega}(\pi, \lambda) \tag{22}$$

donde $\frac{dC_{j,sca}}{d\Omega}(\pi, \lambda)$ es la sección diferencial de scattering en $m^2 sr^{-1}$.

Adicionalmente, se define el espesor óptico de aerosoles (AOD) como la integral del coeficiente de extinción de partículas a lo largo de la distancia que viaja la radiación en la atmósfera como muestra la ecuación (23)

$$AOD(\lambda) = \int_0^{z_{max}} \alpha(z', \lambda) dz' \tag{23}$$

El albedo de scattering simple (SSA) se define como la razón entre el *scattering* y la extinción, como se muestra en la ecuación (24) y, por tanto, es una variable que da información de las partículas absorbentes o no absorbentes en la medida. Si $SSA \approx 1$, implica que la mayor cantidad de partículas son no absorbentes, mientras que si $SSA \approx 0$, la mayor cantidad de partículas son totalmente absorbentes.

$$SSA = \frac{\text{scattering}}{\text{extinción}} = \frac{\text{scattering}}{\text{scattering} + \text{absorción}} \tag{24}$$

La direccionalidad de la energía esparcida por una partícula se describe a través de la función de fase $P(\cos \Theta)$, que representa la fracción de la radiación esparcida entre la dirección de la luz incidente y la de esparcimiento Θ , esto también significa que, cuando se integra sobre la

esfera, la función de fase debe ser igual a uno, lo que se conoce como "condición de normalización" y se muestra en la siguiente expresión:

$$\int_0^{2\pi} \int_0^\pi \frac{P(\cos \Theta)}{4\pi} \sin \Theta d\Theta d\phi = 1 \quad (25)$$

donde ϕ representa la variación azimutal de la función de fase que normalmente se desprecia. Si $\Theta < \frac{\pi}{2}$, el esparcimiento se denomina *forward scattering* o esparcimiento hacia adelante, cuando $\Theta > \frac{\pi}{2}$ se trata del *backscattering* o esparcimiento hacia atrás. Conocida la función de fase de una partícula es posible obtener el parámetro de asimetría (ASY), cuyo valor indica la diferencia en el patrón de *scattering* entre los espacios de delante y de atrás de la partícula, y se expresa como:

$$ASY = \frac{1}{2} \int_{-1}^1 P(\cos \Theta) \cos \Theta d(\cos \Theta) \quad (26)$$

Si ASY tiende a 0, indica que la energía esparcida hacia adelante y hacia atrás es similar, esto sucede comúnmente en partículas con parámetro de tamaño pequeño. Este valor se incrementa a medida que el *scattering* hacia adelante aumenta.

El exponente de Ångstrom (α) representa la influencia del tamaño de los aerosoles y su índice de refracción en la dependencia espectral del *scattering* y la absorción. Se define mediante la siguiente expresión:

$$AOD(\lambda) = AOD(\lambda_R) \left(\frac{\lambda}{\lambda_R} \right)^{-\alpha} \quad (27)$$

donde λ_R es la longitud de onda de referencia. Altos valores del coeficiente de Ångstrom indican mayor presencia de partículas pequeñas, y valores cercanos a cero, indican mayor presencia de partículas grandes en el camino de la radiación.

Es importante notar que las propiedades ópticas anteriormente definidas requieren del tratamiento de los aerosoles como esferas homogéneas, sin embargo, en la Figura 11 se muestra la dependencia de las secciones transversales de *scattering* y de absorción con el parámetro de tamaño para partículas con formas irregulares (Figura 12) y con diferentes valores del índice de refracción. De esta figura, se observa que la sección transversal de absorción efectivamente aumenta con la parte imaginaria del índice de refracción y que existe una relación entre el aumento de la no uniformidad en la partícula y la sección transversal de extinción C_{ext} y de absorción C_{abs} , como se espera de la formulación matemática de la teoría de Mie.

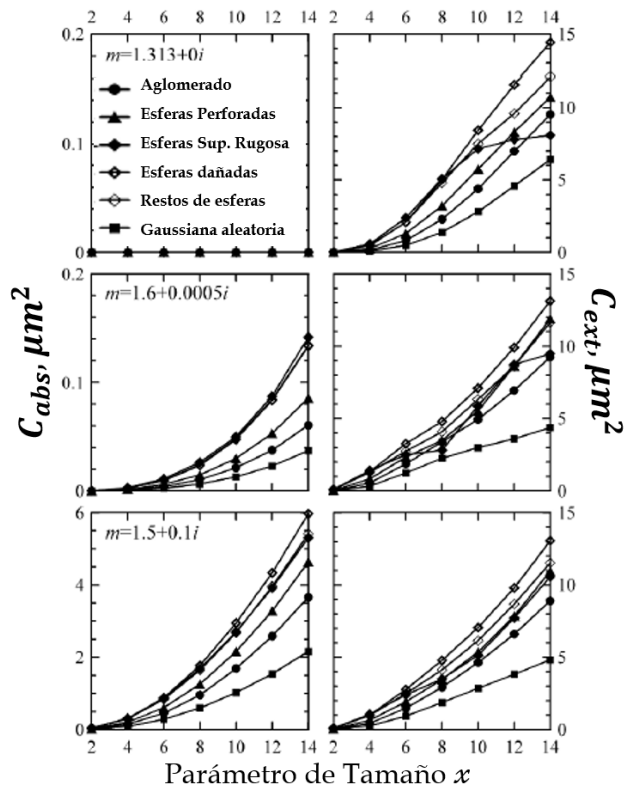


Figura 11. Sección transversal de extinción (derecha) y absorción (izquierda) a $\lambda = 628\text{nm}$ como función del parámetro de tamaño para seis tipos de partícula con formas irregulares y diferentes valores de índice de refracción. *Adaptada de [45].*

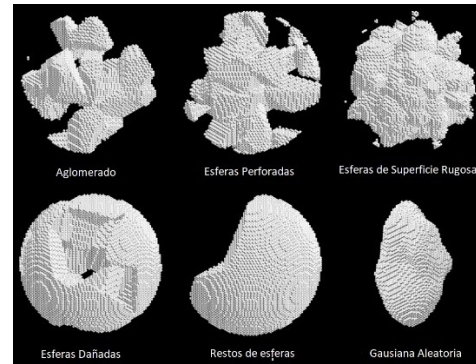


Figura 12. Formas irregulares modeladas. *Adaptada de [45].*

2.2.2 Efectos de la humedad relativa en las propiedades microfísicas y ópticas de los aerosoles

Las propiedades microfísicas de los aerosoles anteriormente mencionadas (tamaño, índice de refracción y forma) podrían afectarse por la humedad presente en el medio que rodea la partícula debido a su capacidad para absorber agua del medio ambiente y aumentar su tamaño, modificando posteriormente sus propiedades ópticas y microfísicas en condiciones de alta humedad relativa. Es decir, el aumento del tamaño de partícula afecta las secciones transversales de esparcimiento y, por tanto, las interacciones entre los aerosoles y las nubes. Es importante aclarar que no todas las partículas tienen la misma capacidad de absorber agua debido a que esta capacidad depende en gran medida de la composición química [46]. El cambio en el diámetro de la partícula debido a la absorción de agua se describe mediante el llamado factor de crecimiento higroscópico, definido generalmente como [47]:

$$g(RH) = \frac{r_{wet}(RH)}{r_{dry}} \quad (28)$$

donde r_{dry} es el radio de la partícula seca y $r_{wet}(RH)$ el radio de la partícula a un valor específico de humedad relativa (HR). El crecimiento higroscópico como función de la HR se describe físicamente en la teoría de Köhler [48] una teoría físico-química, que considera dos efectos: el efecto de la interacción entre la partícula y el vapor de agua y, el efecto del cambio en la curvatura de la superficie de las partículas. Cuando las condiciones medioambientales son las adecuadas para que la partícula continúe creciendo de forma espontánea sin necesidad de un aumento de la HR ambiental y por tanto puede despreciarse el efecto del cambio en la curvatura de partícula absorbiendo agua, es posible calcular el crecimiento higroscópico a través de la parametrización introducida por Petters y Kreidenweis (2007) [49]:

$$g(RH) = \left(1 + \kappa \frac{RH}{1 - RH}\right)^{\frac{1}{3}} \quad (29)$$

donde κ es el parámetro asociado a una medida simple de la higroscopicidad de la partícula al asumir partículas esféricas con composición homogénea. A partir de esta relación se obtuvieron las curvas de la Figura 13 para ilustrar el crecimiento de la partícula en función de la humedad relativa para diferentes composiciones químicas. En la Figura 13 se observa un punto de inflexión a partir del cual el tamaño de la partícula cambia abruptamente, es decir, es el valor de HR a partir del cual las partículas higroscópicas comienzan a absorber agua de la atmósfera y se le conoce como punto de deliquesencia.

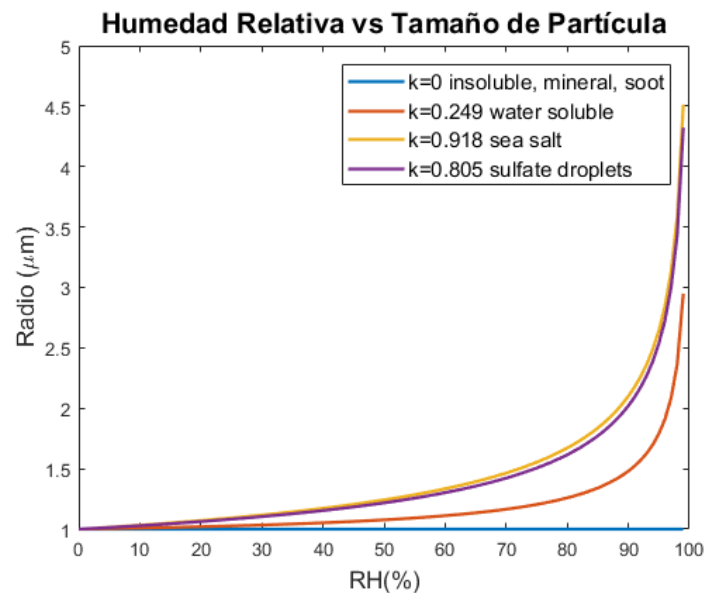


Figura 13. Crecimiento de diferentes tipos de partícula en función de la humedad relativa.

Ahora bien, el índice de refracción de una sustancia también puede variar con la HR. Para calcular esta variación se utilizan los índices de refracción de la sustancia seca (n_{dry}) y del agua (n_{H_2O}), ponderando el volumen de cada una, utilizando la siguiente expresión [47]:

$$n_{wet} = \frac{n_{dry} + n_{H_2O}g(RH)^3 - 1}{g(RH)^3} \quad (30)$$

En la Figura 14 se presentan algunos ejemplos de la variación de la parte real del índice de refracción de diferentes tipos de aerosol con la HR en la que se observa como el índice de refracción de las partículas higroscópicas tiende al valor del índice de refracción del agua ($n_{H_2O}=1.333$) a valores altos de HR.

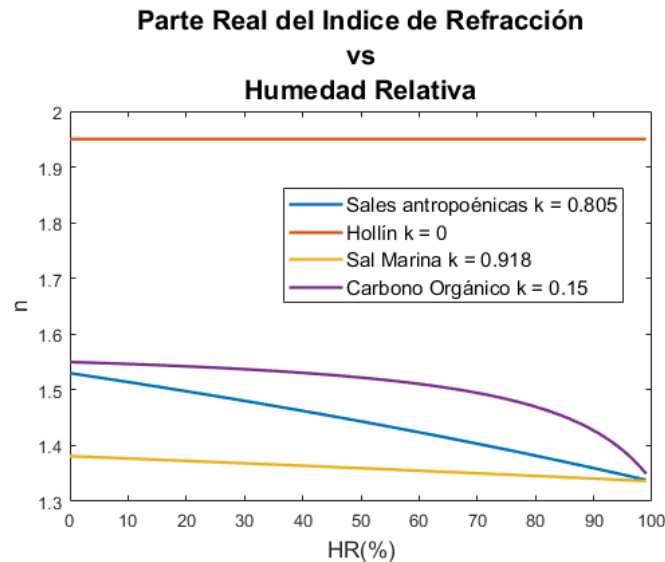


Figura 14. Influencia de la humedad relativa del aire en el índice de refracción de aerosoles.

Finalmente, la humedad relativa también altera la forma de las partículas. A altas humedades, partículas higroscópicas no esféricas cambian su factor de forma dinámico $\chi_{inicial} > 1$, definido en la ecuación (5), hasta convertirse en esferas con $\chi_{final} = 1$ [50] como muestra la Figura 15.

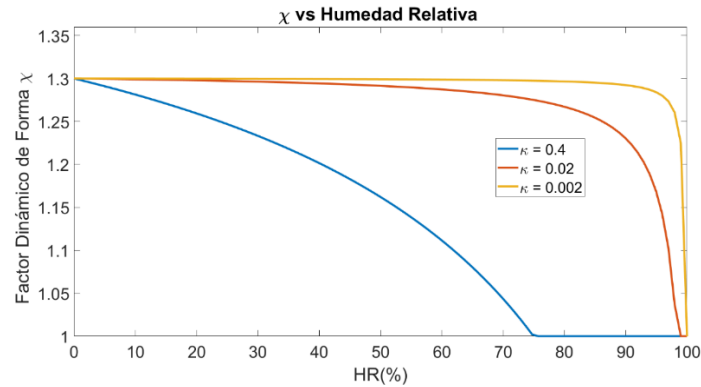


Figura 15. Variación del factor dinámico de forma con la HR para diferentes tipos de aerosoles higroscópicos.

Conociendo el cambio en el tamaño del aerosol con la humedad, del índice de refracción complejo y del factor dinámico de forma, se puede obtener la variación en la sección transversal de *backscattering* con la humedad relativa y, por lo tanto, del coeficiente de *backscattering*.

2.3 Polarización

La polarización de la luz se define como la propiedad de las ondas electromagnéticas que especifica la orientación geométrica de las oscilaciones del campo eléctrico [51] a medida que se desplaza en el espacio [52] [53] (Figura 16 y Figura 17). Matemáticamente la polarización puede escribirse a partir de dos perturbaciones ópticas ortogonales descritas como:

$$E_x = E_{0x} \cos(kz - \omega t) \quad (31)$$

$$E_y = E_{0y} \cos(kz - \omega t + \varepsilon) \quad (32)$$

donde las componentes del campo eléctrico están en los ejes x , y y la dirección de propagación en el eje z . Combinando las ecuaciones (31) y (32) se obtiene la forma más general de propagación de estos campos, descrita por la ecuación de una elipse como se muestra en la Ecuación (33) y en la Figura 18 denominada elipse de polarización.

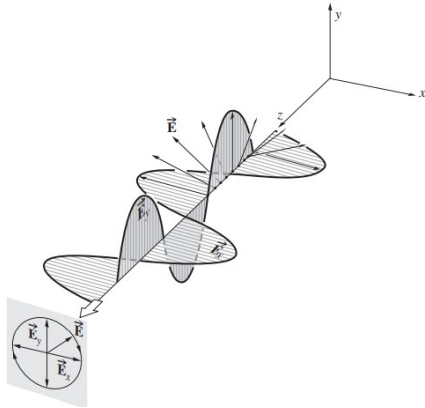


Figura 16. Vector del campo eléctrico propagándose de forma circular a través del eje Z [52]

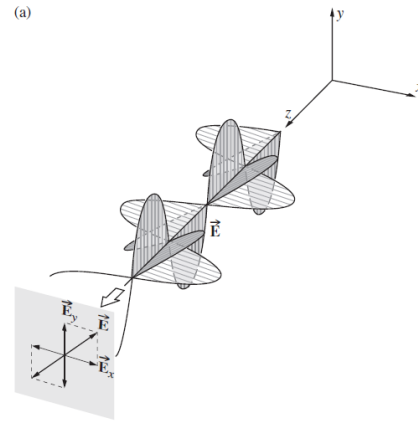


Figura 17. Campo eléctrico polarizado en el primer y tercer cuadrante [52]

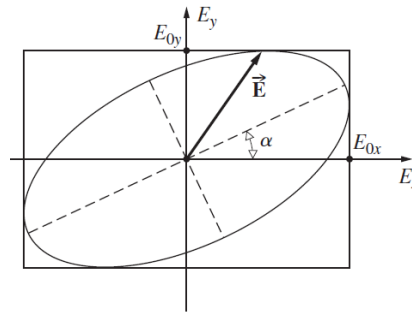


Figura 18. Elipse de propagación del campo eléctrico [52]

$$\left(\frac{E_y}{E_{0y}}\right)^2 + \left(\frac{E_x}{E_{0x}}\right)^2 - 2\left(\frac{E_x}{E_{0x}}\right)\left(\frac{E_y}{E_{0y}}\right)\cos(\varepsilon) = \sin^2 \varepsilon \quad (33)$$

Donde E_{0x} y E_{0y} son las amplitudes de los campos eléctricos en x , y y ε es la diferencia entre las fases iniciales de E_x y E_y . La orientación de la elipse dada por el ángulo α respecto a los ejes del sistema coordenado (E_x, E_y) se muestra en la Ecuación (34):

$$\tan 2\alpha = \frac{2E_{0x}E_{0y}\cos\varepsilon}{E_{0x}^2 - E_{0y}^2} \quad (34)$$

Si $\alpha = 0$ corresponde a valores $\varepsilon = \pm \frac{\pi}{2}, \pm \frac{3\pi}{2}, \pm \frac{5\pi}{2}, \dots$, y se obtiene la forma más conocida de la elipse:

$$\frac{E_y^2}{E_{0y}^2} + \frac{E_x^2}{E_{0x}^2} = 1 \quad (35)$$

Si las amplitudes de los campos eléctricos son iguales, es decir, $E_0 = E_{0x} = E_{0y}$, la Ecuación (35) se reduce a la ecuación de una circunferencia como se muestra en la Ecuación (36) y por tanto, representa luz circularmente polarizada, como se ilustra en la Figura 16.

$$E_x^2 + E_y^2 = E_0^2 \quad (36)$$

Ahora, si ε es múltiplo de π , la Ecuación (33) se convierte en:

$$E_y = \frac{E_{0y}}{E_{0x}} E_x \quad (37)$$

que es la ecuación de una recta, y representa la polarización lineal del campo.

2.3.1 Descripción matricial de la polarización

Una vez definido el fenómeno de polarización es fundamental entender qué sucede con la polarización de una onda de luz cuando interactúa con un medio. Para esto se usa inicialmente el formalismo de Jones, asumiendo un haz de luz monocromático, polarizado y de frente de onda plano. En este formalismo el vector de propagación y las amplitudes complejas de la luz polarizada se describen a través del vector de Jones, mientras que los componentes ópticos o el medio son representados por matrices 2x2 denominadas matrices de Jones. El resultado de la interacción luz-medio se encuentra multiplicando la matriz de Jones del medio y el vector de Jones de la luz incidente, como muestran las ecuaciones (38) y (39).

$$E_t = AE_i \quad (38)$$

$$\begin{bmatrix} E_{tx} \\ E_{ty} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_{ix} \\ E_{iy} \end{bmatrix} \quad (39)$$

donde E_{tx} , E_{ty} representan la polarización después de la interacción de la luz con el medio, E_{ix} , E_{iy} representan la polarización de la luz incidente y A es la matriz de Jones del medio.

Sin embargo, esta formulación tiene la limitación experimental de la imposibilidad de medir los campos eléctricos directamente, además, no es aplicable a luz aleatoriamente polarizada, parcialmente polarizada o incoherente, por lo anterior en 1852, Sir. G. G. Stokes propone el uso de los denominados parámetros de Stokes para representar a través de observables, como la intensidad, los estados parciales o completos de polarización de la luz y su atenuación a medida que se propaga a través de un medio. Estos parámetros denotados como S_0, S_1, S_2, S_3 ó I, Q, U, V se definen a partir de las componentes del campo eléctrico como sigue:

$$\begin{aligned} I = S_0 &= E_{0x}^2 + E_{0y}^2 \\ Q = S_1 &= E_{0x}^2 - E_{0y}^2 \\ U = S_2 &= 2E_{0x}E_{0y}\cos(\delta) \\ V = S_3 &= 2E_{0x}E_{0y}\sen(\delta) \end{aligned} \quad (40)$$

donde I indica la intensidad total del campo eléctrico, Q indica la intensidad de polarización horizontal y vertical, U la intensidad de polarización a $\pm 45^\circ$ y V la intensidad de polarización circular. En la Figura 19 se representan los parámetros de Stokes en estados degenerados a partir del caso general de polarización elíptica.

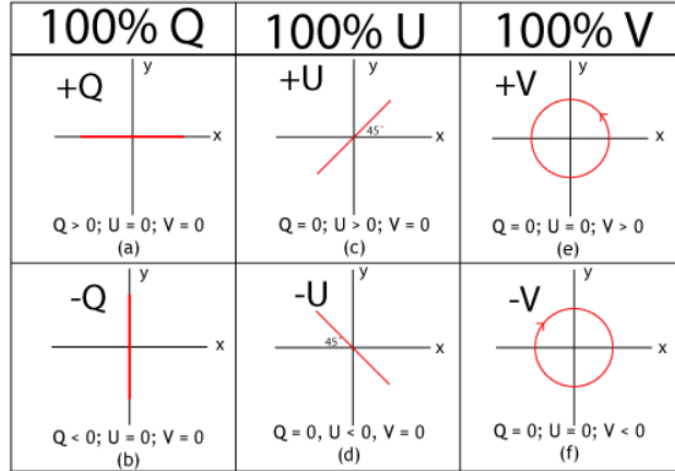


Figura 19. Casos particulares de polarización elíptica, lineal y circular [20].

La formulación del estado de polarización de la luz a través del vector columna que considera los cuatro parámetros de Stokes exige el uso de una matriz 4x4 que represente el medio transformador entre los parámetros de Stokes de la luz incidente y la de salida del medio de propagación. Esta matriz conocida como la matriz de Müller (\mathbf{F}) describe las propiedades polarimétricas del medio como la diatenuación, la birrefringencia y la despolarización [53].

Por lo tanto, el formalismo Müller-Stokes que relaciona la polarización de entrada con la de salida de un sistema se escribe como:

$$(I, Q, U, V) = \mathbf{F} \cdot (I_0, Q_0, U_0, V_0) \quad (41)$$

donde la matriz \mathbf{F} , como elemento transformador, permite modelar fenómenos ópticos como reflexión, transmisión o *scattering*. En este trabajo es de especial interés el fenómeno de *scattering*, por ello se usará el subíndice *sca* para indicar la luz esparcida e *inc* para indicar la luz incidente. De este modo, la forma extendida de la Ecuación (41) es:

$$\begin{bmatrix} I^{sca} \\ Q^{sca} \\ U^{sca} \\ V^{sca} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_{11} & f_{12} & f_{13} & f_{14} \\ f_{21} & f_{22} & f_{23} & f_{24} \\ f_{31} & f_{32} & f_{33} & f_{34} \\ f_{41} & f_{42} & f_{43} & f_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I^{inc} \\ Q^{inc} \\ U^{inc} \\ V^{inc} \end{bmatrix} \quad (42)$$

El detalle de la construcción de la matriz \mathbf{F} de cualquier medio a través de los campos eléctricos o el formalismo de Jones, se encuentra en Van der Hulst, 1981 [40]. Mientras que la construcción experimental de esta matriz se describe en Cano-Barrera, 2017 [53]. A menudo es conveniente reescribir la matriz de Müller para cálculos de propiedades

polarimétricas de un medio que contiene esparsos, como la atmósfera, usando la notación de Perrin [40], en la cual, los elementos de la matriz F se escriben como sigue:

$$F = \begin{bmatrix} a_1(\theta) & b_1(\theta) & b_3(\theta) & b_5(\theta) \\ c_1(\theta) & a_2(\theta) & b_4(\theta) & b_6(\theta) \\ c_3(\theta) & c_4(\theta) & a_3(\theta) & b_2(\theta) \\ c_5(\theta) & c_6(\theta) & c_2(\theta) & a_4(\theta) \end{bmatrix} \quad (43)$$

donde θ indica el ángulo de orientación de la partícula. Esta es la matriz que representa un medio que contiene esparsos orientados aleatoriamente y con formas completamente irregulares. Para el cálculo de varias partículas, se suman las contribuciones de cada una de ellas [40].

Si las partículas o esparsos tienen un plano de simetría definido, pero se orientan aleatoriamente, la matriz F se escribe como se muestra en la Ecuación (44) [54].

$$F = \begin{bmatrix} a_1(\theta) & b_1(\theta) & 0 & 0 \\ b_1(\theta) & a_2(\theta) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & a_3(\theta) & b_2(\theta) \\ 0 & 0 & -b_2(\theta) & a_4(\theta) \end{bmatrix} \quad (44)$$

A partir de la matriz F se define la razón lineal de despolarización (δ), como muestra la Ecuación (1)

$$\delta = \frac{a_1(180^\circ) - a_2(180^\circ)}{a_1(180^\circ) + a_2(180^\circ)} \quad (45)$$

Este valor representa el aporte de las oscilaciones horizontal y vertical del campo eléctrico después de ser esparcido por una partícula, sin embargo, es importante recalcar que a través de este parámetro no se puede especificar el tipo de polarización de la luz a la salida del sistema.

2.3.2 Propiedades polarimétricas de un medio

a. Diatenuación

La diatenuación también conocida como dicroísmo, se asocia a la capacidad de un medio para presentar diferentes transmitancias en función del estado de polarización de la luz. En un diatenuador ideal, la intensidad transmitida es máxima para un estado incidente y cero para su estado ortogonal, este es el comportamiento de un polarizador ideal. No obstante, la diatenuación puede darse de manera tal que tan solo un porcentaje de una o ambas componentes sea atenuado [53] [55]. Para cuantificar esta propiedad se usa la siguiente definición:

$$D(\lambda) = \frac{I_{max}(\lambda) - I_{min}(\lambda)}{I_{max}(\lambda) + I_{min}(\lambda)} \quad (46)$$

donde $D(\lambda)$ es la diatenuación del medio en función de la longitud de onda, I_{max} e I_{min} son las intensidades transmitidas máxima y mínima.

b. Birrefringencia

La birrefringencia es la propiedad de algunos materiales cristalinos que tienen un comportamiento ópticamente anisotrópico y se caracterizan por presentar dos índices de refracción. Para cada par de estados ortogonales que se propagan a través de un medio birrefringente, este posee un índice de refracción diferente, lo que implica que una de las componentes del campo eléctrico se propagará más rápido que la otra, introduciendo un desfase o retardo entre componentes, por ello a los elementos birrefringentes también se les conoce como retardadores. Los medios birrefringentes suelen caracterizarse por la diferencia entre sus índices de refracción como [53] [56]:

$$\Delta n(\lambda) = |n_1(\lambda) - n_2(\lambda)| \quad (47)$$

donde la birrefringencia, $\Delta n(\lambda)$ depende de los índices de refracción del eje rápido $n_1(\lambda)$ y el eje lento $n_2(\lambda)$.

c. Despolarización y Polarizancia

La despolarización indica la capacidad de un medio de modificar el estado de polarización inicial de la luz a un estado de polarización que es el resultado de la superposición de todos los estados de polarización. Esto ocurre debido a la anisotropía de las moléculas del medio, que mueven el momento dipolar por fuera de eje del campo incidente. La atmósfera y sus componentes pueden despolarizar la luz dependiendo de la forma, tamaño y composición química de las partículas presentes en la interacción. Para medir la cantidad de despolarización se usa el parámetro definido en la sección 2.3.1, la razón lineal de despolarización o LDR, definido como:

$$\delta = \frac{I_{\perp}}{I_{\parallel}} \quad (48)$$

donde I_{\perp} e I_{\parallel} son las intensidades de las componentes perpendicular y paralela de la luz después de la interacción con el medio.

Por otra parte, la polarizancia es la capacidad que tiene un medio de convertir luz polarizada aleatoriamente en luz con cierto grado de polarización. El grado de polarización es dado por:

$$I_{polarizada} = \sqrt{s_1^2 + s_2^2 + s_3^2} \quad (49)$$

donde s_1, s_2, s_3 son los parámetros de Stokes.

2.4 Técnica Lidar

Un sistema de medición Lidar, cuyo nombre proviene del acrónimo para “*Light Detection and Ranging*” es, en términos generales, un instrumento que permite obtener información de la interacción de la luz con un medio a diferentes distancias utilizando un láser pulsado y midiendo tanto la intensidad de la luz que se atenúa en el medio y el tiempo que tarda un pulso entre su emisión y retorno.

Una de las principales aplicaciones de este tipo de sistemas se encuentra en los estudios atmosféricos a través de la comprensión de los fenómenos de interacción radiación – partícula, especialmente, el *scattering* o esparcimiento. Dependiendo de la configuración del Lidar pueden medirse parámetros como temperatura del aire y velocidad del viento (Lidar Doppler) [57], gases traza ([58]), nubes y aerosoles (Lidar elástico y Lidar Raman) [59].

La configuración básica de un sistema Lidar, ilustrada en la Figura 20 consiste en, a) un sistema óptico de emisión que se encarga de enviar los haces de luz pulsados hacia la atmósfera, b) un sistema óptico de recepción, cuya función es recolectar la radiación retroesparcida en la línea de visión del láser y c) un sistema opto-electrónico de detección y registro, es decir, los fotosensores que amplifican la señal recolectada, un sistema electrónico de alta velocidad para la transducción y registro de la señal óptica, y un computador que adquiere y procesa los datos.

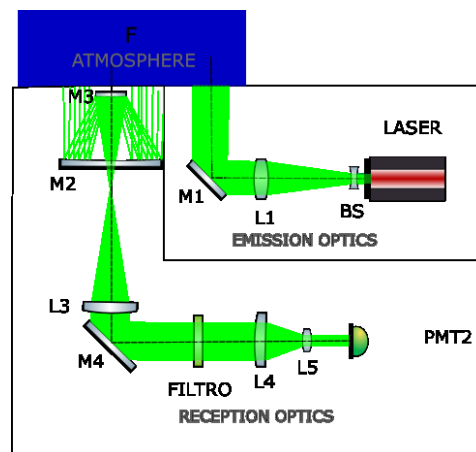


Figura 20. Configuración óptica típica de un sistema Lidar. Adaptado de [14]

2.4.1 Lidar de despolarización

Debido al objetivo de este trabajo, es de especial interés el tipo de sistemas Lidar de despolarización, en los cuales la luz recolectada desde la atmósfera se hace pasar por un divisor de haz polarizado o PBS (*Polarized Beam Splitter*), que separa las componentes

paralela y perpendicular del campo óptico de la luz antes de ser detectados por los fotomultiplicadores o PMT (*Photomultiplier Tubes*), los fotosensores que miden la intensidad de cada una de estas componentes. Un esquema de esta configuración se muestra en la Figura 21.

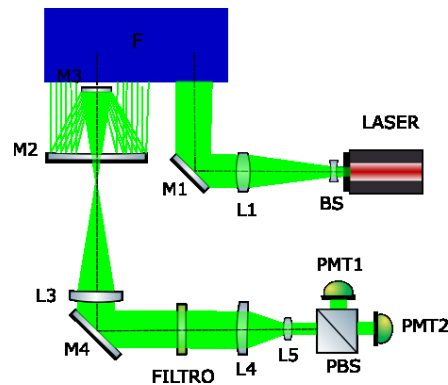


Figura 21. Configuración óptica de un sistema Lidar de despolarización. Adaptado de [14].

Inicialmente los sistemas Lidar de despolarización tenían el objetivo de distinguir entre componentes más o menos despolarizantes [60], por ello los primeros trabajos con este Lidar están dedicados a la diferenciación de nubes de agua y nubes de hielo. Actualmente se comprende que la técnica Lidar de despolarización permite determinar indirectamente la forma efectiva del aerosol de acuerdo con la capacidad de despolarización de la partícula, convirtiéndose así en una herramienta clave para la recuperación de las propiedades físicas del aerosol. En la literatura, la variable más utilizada para cuantificar la capacidad de despolarización de los aerosoles atmosféricos es la razón lineal de despolarización volumétrica (LDRV), definida como la relación entre la suma de los coeficientes de retroesparcimiento perpendicular (s) y paralelo (p) de los aerosoles y moléculas cuando la radiación polarizada linealmente interactúa con ellos [61].

2.5 Calibración de señales de despolarización por scattering

En las medidas de despolarización con Lidar, uno de los factores determinantes en la fiabilidad de las medidas, es la calibración del sistema. Para esto es muy importante contar con una atmósfera estable y garantizar la alineación de la óptica de emisión, recolección y detección. Al respecto se han publicado diferentes metodologías para disminuir las incertidumbres en los valores de despolarización arrojados por las mediciones, entre ellas se destaca el método Delta90 introducido por Volker Freudenthaler [14], en el que se evalúa los efectos de la óptica polarizadora en las señales del sistema describiendo los elementos ópticos individuales del Lidar y del estado de polarización de la luz mediante el formalismo de Mueller-Stokes. Freudenthaler [14] derivó las ecuaciones analíticas generales para establecer la dependencia de las señales Lidar de los parámetros de polarización y para obtener la

relación de despolarización lineal. Este método también se puede utilizar para el cálculo del error sistemático causado por elementos ópticos no ideales, su desalineación rotacional y la polarización no ideal del láser [62].

Según el método Delta90, debe usarse un calibrador para manipular el estado de polarización inicial, por ejemplo: placas de $\lambda/2$ y $\lambda/4$, rotadores mecánicos (rotar el sistema coordinado) o polarizadores lineales [14] para encontrar un factor de calibración que compense los errores introducidos. El primer paso para la calibración del sistema óptico implica la determinación de un factor de calibración aparente, que engloba los efectos del PBS, la ganancia de los fotomultiplicadores y la óptica entre el calibrador y los fotodetectores [62]. Este factor se determina experimentalmente rotando el calibrador $+45^\circ$ y -45° (o en general cualquier par de ángulos cuya diferencia sea 90°) respecto al eje óptico del elemento, midiendo la intensidad de cada una de las componentes del haz polarizado y utilizando la siguiente expresión:

$$\eta^* = \frac{I_R}{I_T} (\pm 45^\circ) \quad (50)$$

Para cada una de estas rotaciones, las irradiancias del haz reflejado I_R y del haz transmitido I_T en el PBS deberían ser iguales, cualquier diferencia entre ellas se debe a efectos indeseados de polarización por los componentes ópticos. Posteriormente, $\eta_{\Delta 90}^*$ relaciona las rotaciones a $+45^\circ$ y -45° como sigue:

$$\eta_{\Delta 90}^* = \sqrt{\eta^*(+45^\circ + \varepsilon)\eta^*(-45^\circ + \varepsilon)} \quad (51)$$

donde ε es un error introducido por la mecánica del rotador del PBS, (idealmente $\varepsilon = 0$). Para obtener el factor de calibración real η , debe tenerse en cuenta el valor teórico K que incluye todos aquellos efectos polarizantes de los elementos ópticos que no se encuentran entre el calibrador y los fotodetectores. Por tanto, η se obtiene así:

$$\eta_{\Delta 90} = \frac{1}{K} \eta_{\Delta 90}^* \quad (52)$$

donde $K = 1$ es el valor ideal. El parámetro de despolarización lineal volumétrica aparente está dada por:

$$\delta^* = \frac{1}{\eta_{\Delta 90}} \frac{I_R(0^\circ)}{I_T(0^\circ)} \quad (53)$$

Adicionalmente, se consideran las constantes G_T , H_T , G_R y H_R , que describen las señales reflejadas y transmitidas en los elementos ópticos, de modo que el LDR volumétrico se determina usando la expresión:

$$\delta_v = \frac{\delta^*(G_T + H_T) - (G_R + H_R)}{(G_R - H_R) - \delta^*(G_T - H_T)} \quad (54)$$

Obtenida la razón lineal de despolarización volumétrica corregida δ , el cálculo de LDR de partículas, que excluye la influencia de moléculas se define como muestra la Ecuación 55.

$$\delta_p = \frac{(1 + \delta_m)\delta_v R - (1 + \delta_v)\delta_m}{(1 + \delta_m)R - (1 + \delta_v)} \quad (55)$$

donde δ_m es la razón de despolarización lineal de moléculas y R es la razón de *backscattering*.

Las medidas de despolarización y de otras propiedades ópticas de aerosoles se interpretan bajo la premisa de que la atmósfera es un medio ideal, sin embargo, existen muchas variables que entran en juego con la medida e introducen errores que no pueden ser controladas. Por eso se hacen necesarios otros métodos más precisos que permitan contrastar y complementar resultados de medidas, tales como los métodos computacionales y simulación de atmósferas controladas.

2.6 Métodos computacionales para la predicción de scattering de partículas

En la literatura se encuentran cuatro métodos computacionales básicos para el modelamiento computacional del *scattering* de partículas que utilizan como parámetros de entrada el tamaño y la forma. Estos métodos computacionales son Teoría Mie, T-Matrix, DDA e IGOM. A continuación, se describen las principales ventajas, desventajas y las plataformas en los que se encuentran desarrollados. En el sitio *scattport* [63] se encuentran los códigos de estos métodos disponibles para descarga libre.

Teoría Mie [64] [65]: Resuelve las ecuaciones de Maxwell para el scattering de una onda electromagnética plana por una esfera homogénea. El código computacional fue desarrollado en Fortran por Mishchenko (2002) [66] y actualmente es posible encontrarlo en plataformas virtuales [67] en PythonTM, MATLAB®, Wolfram Mathematica y otros lenguajes. Esta teoría solo admite partículas esféricas, por lo que no es posible realizar cálculos de razón lineal de despolarización.

Método T-Matrix (TMM): El método T-Matrix es una herramienta que permite describir el *scattering* de la luz para partículas resonantes no esféricas a partir de la solución de las ecuaciones de Maxwell con condiciones de frontera. El detalle del tratamiento matemático de este método es descrito por Michael M. y Larry T. (1996) [21], y por M. Mishchenko et al. (2000) [68].

En este modelo los campos eléctricos incidente E_{inc} y esparcido E_{sca} se expresan en términos de funciones de onda esféricas como muestran las ecuaciones (56) y (57):

$$\mathbf{E}^{inc} = \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=-n}^n a_{mn} \mathbf{M}_{mn}^1 + b_{mn} \mathbf{N}_{mn}^1 \quad (56)$$

$$E^{sca} = \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=-n}^n f_{mn} M_{mn}^3 + g_{mn} N_{mn}^3 \quad (57)$$

donde M^1, N^1 y M^3, N^3 son conjuntos de soluciones linealmente independientes y a, b y f, g son los coeficientes de expansión de los campos incidente y esparcido respectivamente.

La matriz T relaciona los coeficientes de expansión del campo incidente con los del campo esparcido, a través de la siguiente expresión

$$\begin{bmatrix} f \\ g \end{bmatrix} = T \begin{bmatrix} a \\ b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_{11} & T_{12} \\ T_{21} & T_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ b \end{bmatrix} \quad (58)$$

De manera que la matriz T está determinada por la forma y el material del esparsor y para un campo incidente determinado se permite calcular el campo esparcido.

Discrete Dipole Approximation (DDA) [23]: El método de Aproximación de Dipolo Discreto (DDA) es un algoritmo para predecir el *scattering* de la luz por partículas con geometría irregular. El método se basa en dividir el objeto continuo en una matriz finita de puntos polarizables, los cuales adquieren momento dipolar en respuesta al campo eléctrico local. Este método es muy útil ya que permite estudiar partículas bajo condiciones más cercanas a las condiciones reales de la atmósfera y se encuentra de forma libre para Fortran, C y C++. Adicionalmente, tiene la ventaja de incluir seis formas de partículas irregulares ya establecidas, como se muestran en la Figura 22 [69]. En esta Figura, las partículas A, B y C son esferoides prolatos con superficie de deformación de acuerdo a Gardner (1984) [70] con relaciones de aspecto es $\epsilon' = 1.4, 1.8$ y 2.4 respectivamente. La forma D es una partícula de agregados, es decir, en la superposición de elipsoides con superficie de deformación de acuerdo con Gardner, con $\epsilon' \approx 1.8$. Las formas: E y F tienen superficies planas y bordes, siendo E un esferoide oblatos con $\epsilon' \approx 1.3$ y F una derivación de E achatado en una dimensión con $\epsilon' \approx 2.3$.

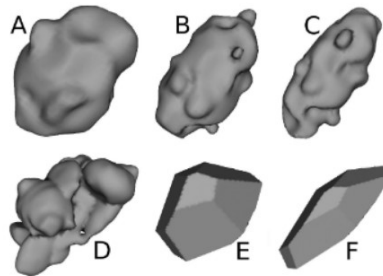


Figura 22. Partículas irregulares para modelos computacionales [69]

Improved Geometric Optics Method (IGOM): Este método permite calcular el *scattering* de partículas para esferoides en el rango donde T-Matrix ya no es funcional, es decir, para partículas cuyo tamaño con respecto a la longitud de onda de la luz pertenecen a la óptica geométrica y, por lo tanto, no aplicable en este trabajo.

MOPSMAP (Modeled optical properties of ensembles of aerosol particles): Este es un algoritmo desarrollado por Josef Gasteiger J y Wiegner M. (2018) [25] que recoge las ventajas de cada uno de los métodos computacionales mencionados, lo cual permite calcular el esparcimiento para un amplio rango de formas, tamaños e índices de refracción de partículas. Este desarrollo consiste en un conjunto de datos precalculados de propiedades ópticas de aerosoles individuales que interpola para partículas orientadas aleatoriamente. Puede usarse a través de una interfaz web <https://mopsmap.net> o descargando el programa en Fortran para cálculos off-line en <https://mopsmap.net/index.html>.

Capítulo 3

MÉTODOS E INSTRUMENTACIÓN

En este capítulo se describen las actividades y procesos desarrollados para obtener valores de la razón lineal de despolarización de aerosoles atmosféricos bajo condiciones controladas de laboratorio. En primera instancia se describe el sistema experimental de volumen de aire definido en el que controlando las variables atmosféricas predominantes como la humedad relativa (HR) y temperatura (T) e inyectando partículas en suspensión, se recrea en condiciones de laboratorio algunas características de la atmósfera terrestre.

Posteriormente se presenta en detalle la configuración óptica para la emisión de la luz láser y la recolección de la señal óptica retroesparcida por las partículas desde el volumen de aire delimitado, así mismo, se describen los efectos de este sistema óptico sobre la polarización de la luz y la implementación del proceso de calibración utilizado. Finalmente, se describe detalladamente el sistema experimental completo para la obtención de las medidas que permiten calcular la razón lineal de despolarización de partículas y los algoritmos de simulación de las propiedades ópticas por *scattering* utilizados como referencia para la comparación teórica – experimental de los resultados de este trabajo.

3.1 Montaje experimental para la obtención de las condiciones atmosféricas en laboratorio.

3.1.1 Sistema de control de Humedad Relativa (HR) y Temperatura (T).

Para simular las condiciones atmosféricas en el laboratorio se utiliza una cámara de aerosoles de 0,015 m³ construida en acero inoxidable en la que se realiza la inyección y la extracción de los aerosoles y dentro de la cual se estudia la atenuación por *scattering* de aerosoles de la radiación láser. Para el volumen de aire contenido dentro de esta cámara se ha desarrollado un sistema de control de la humedad relativa (HR) y la temperatura (T).

El mecanismo de humidificación implementado se basa en el transporte de aire húmedo desde un recipiente A hasta el recipiente B por generación de burbujas [71] [72] [73], como se muestra en la Figura 23. En el recipiente hermético A se aplica una presión de aire a través del tubo 1 dentro del agua, generando burbujas que al vencer la tensión superficial del agua liberan gotas que quedan suspendidas en el aire, y por la diferencia de presión entre A y B el aire húmedo generado en A es transportado por el tubo 2 hasta B, aumentando la humedad relativa en este último. Finalmente, el incremento de presión en B es liberada a través del tubo 3. Para deshumidificar el aire dentro de la cámara, se usa una bomba de vacío como extractor en combinación con un filtro de humedad, las características técnicas de la bomba de vacío se presentan en la Tabla 3.

Para elegir el higrómetro se estudiaron diferentes opciones de sensores, que según su principio de funcionamiento se clasifican en: capacitivo, resistivo, térmico y gravimétrico. Teniendo en cuenta la disponibilidad comercial, el bajo costo, el tiempo de respuesta adecuado para el experimento (2,0 segundos), la calibración y la facilidad de comunicación con Arduino, se ha seleccionado el sensor AM2305 [74] de tipo capacitivo, que permite medir tanto HR como T.

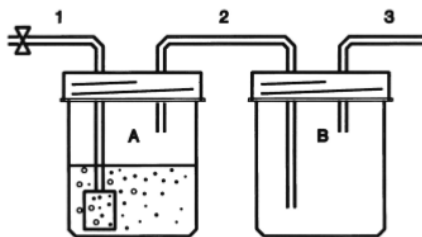


Figura 23. Sistema de humidificación por generación de burbujas [72]

Tabla 3. Bomba de vacío usada para la deshumidificación de la cámara

| | |
|-----------------------|----------------------|
| Modelo | ZRU-0 5 ^a |
| Aire libre desplazado | 1.2 CFM |
| Presión parcial | 2.0 Pa |
| Presión total | 150 micron |
| Voltaje | 110V-115 V/ 60 Hz |
| Potencia | 1/6 HP |
| Capacidad aceite | 160 ml |

Para caracterizar los actuadores y el sensor del sistema de control de HR, se ha desarrollado un programa en LabVIEW para adquirir, graficar y exportar los datos medidos por el sensor, como se ilustra en la interfaz que se muestra en la Figura 24, es importante destacar que las gráficas de las variables meteorológicas muestran los datos de la lectura en tiempo real.

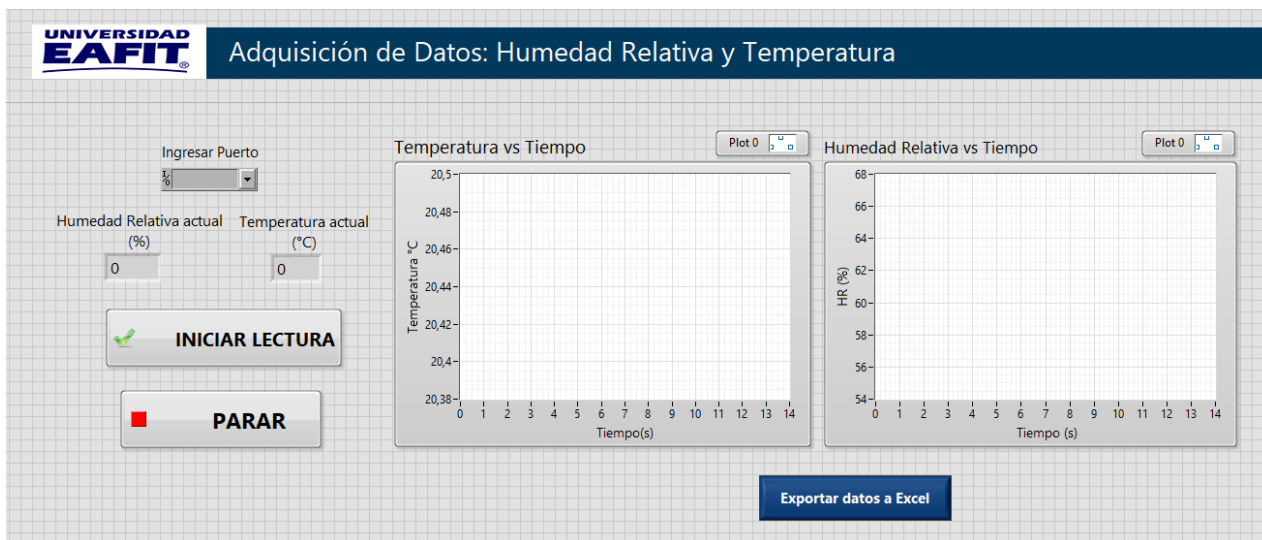
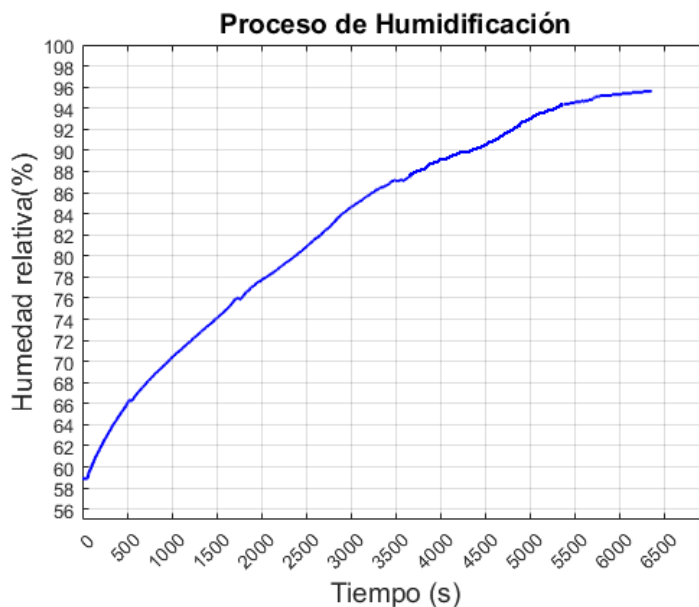


Figura 24. Interfaz para la adquisición de datos.

El resultado de la caracterización de humidificación y deshumidificación del sistema se presenta en las gráficas de la Figura 25. Como se muestra en la parte a), se alcanza una humedad relativa del 96% dentro de la cámara mientras que en la gráfica b) se muestra que con el sistema deshumidificador activo la humedad relativa decae hasta un mínimo de 47%, por las características físicas de la cámara y del experimento no es posible deshumidificar por debajo de este valor mínimo.



(a)

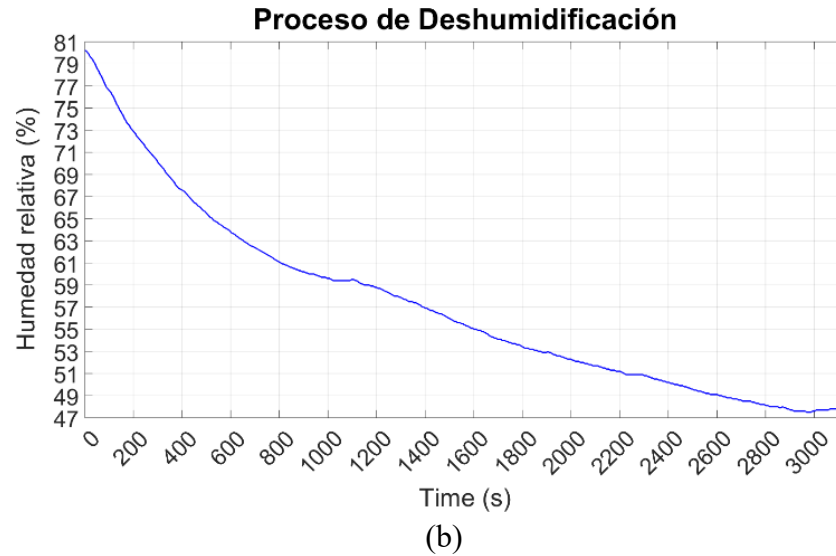


Figura 25. Caracterización del sistema de humedad control de humedad relativa. a) Proceso de humidificación, b) proceso de deshumidificación. Los dos procesos ocurren dentro de la cámara.

La Figura 26 muestra el comportamiento del sistema de control para un valor de referencia de la humedad relativa de 75%, en la que se observa la estabilidad del *setpoint* establecido a una temperatura constante de $21,22 \pm 0,08^{\circ}\text{C}$

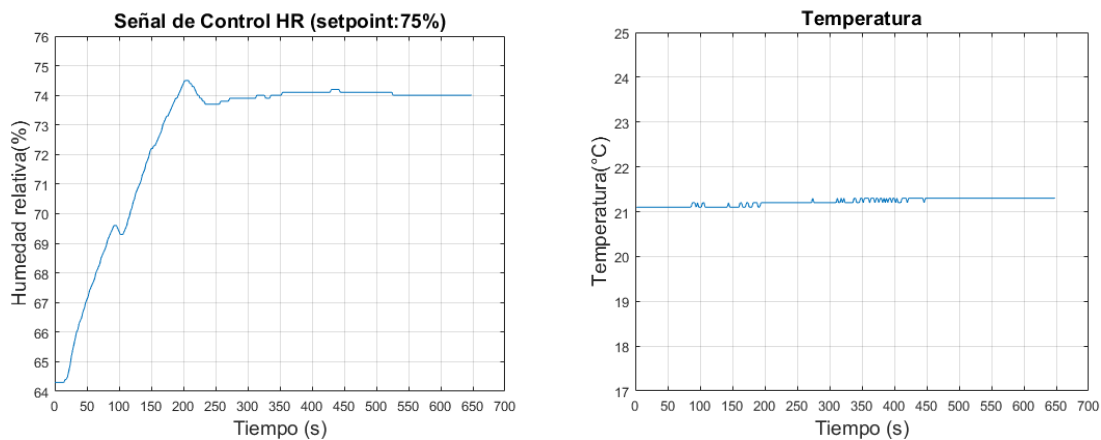


Figura 26. Señal de control para humedad relativa con *setpoint*: 75% para temperatura del aire constante de $21,22^{\circ}\text{C} \pm 0,08$

Respecto al control de temperatura desarrollado, utiliza el sensor de tipo resistivo DS18B20 [75], por las adecuadas prestaciones técnicas (resolución programable de $0,5^{\circ}\text{C}$ a $0,125^{\circ}\text{C}$, alta frecuencia de muestreo de 10 muestras/s y rango de operación de -55°C hasta los 125°C) y su asequibilidad comercial. Como actuador del sistema se utilizan celdas Peltier, en estas se genera una diferencia de temperatura a través de la unión de dos metales o semiconductores tipo P y N entre sus caras, al circular la corriente una de sus caras se enfría

mientras que la otra se calienta. Finalmente, el control en lazo cerrado implementando para este sistema de sensores-actuadores para la humedad relativa del aire es un ON-OFF y para la temperatura es un control PID. La Figura 27 muestra el resultado de la caracterización del control de temperatura.

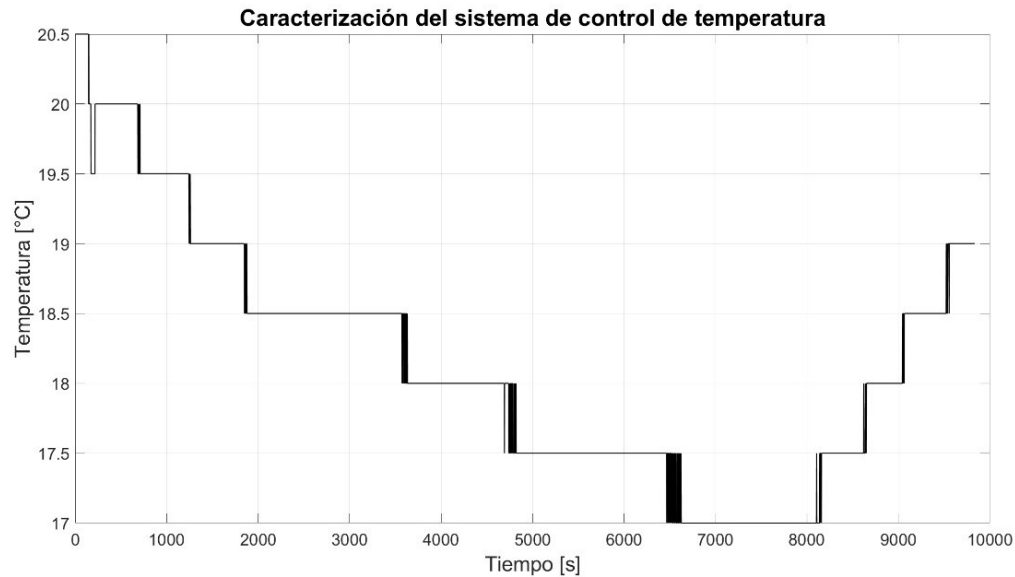


Figura 27. Caracterización del sistema de control de temperatura dentro de la cámara.

3.1.2 Sistema de generación de aerosoles.

La configuración de la cámara de aerosoles en el laboratorio se complementa con un sistema propio de producción de aerosoles, para el cual se han seleccionado los aerosoles que mejor representan la baja tropósfera del Valle de Aburrá. Esta información se ha obtenido a través de la revisión de los inventarios de emisiones atmosféricas realizados por el Área Metropolitana del Valle de Aburrá [76] con el apoyo de Universidades locales sobre la composición química de estos (Figura 28) [77] [78] [79].

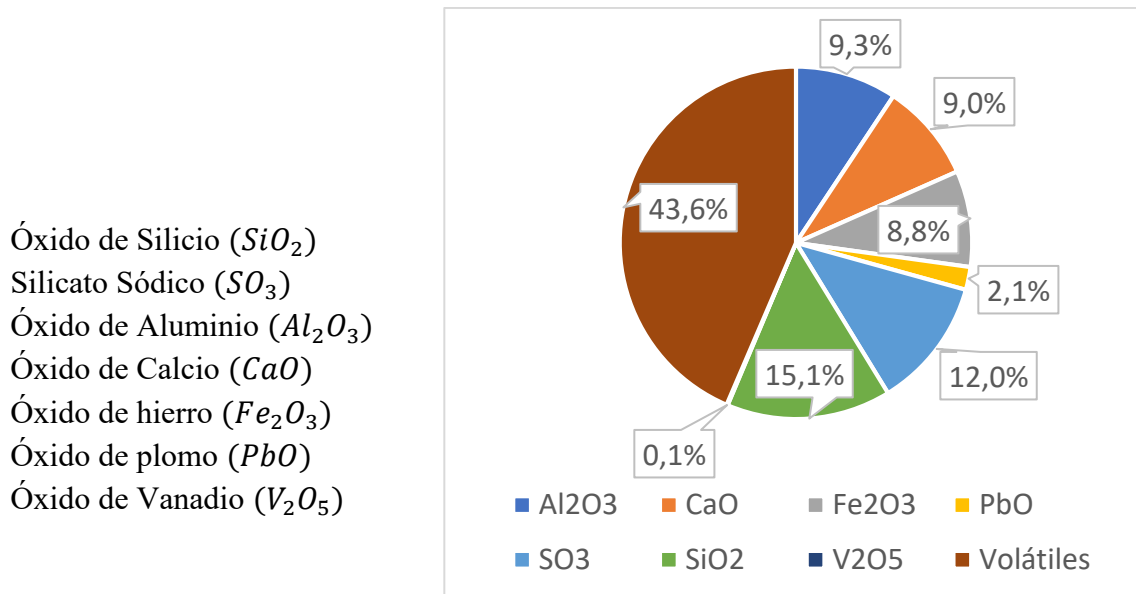


Figura 28. Química atmosférica en el Valle de Aburrá [76] .

El óxido de calcio (CaO) es uno de los componentes químicos seleccionados para la producción de aerosoles en laboratorio. Este compuesto se encuentra presente de forma abundante en la baja tropósfera de Medellín entre los compuestos no volátiles, las principales fuentes son rocas y construcciones, y al reaccionar con el vapor de agua y el dióxido de carbono en el aire producen carbonato de calcio (CaO_3). Entre las propiedades ópticas destacables se encuentra que es altamente birefringente [80]. Su hoja de seguridad indica que este químico es levemente peligroso por contacto cutáneo, ingestión o inhalación [81] lo que facilita su manipulación y finalmente, es un importante componente del polvo mineral [82] y altamente reactivo, al contacto con algunos gases traza presentes en la atmósfera se vuelve altamente higroscópico actuando activamente como núcleos de condensación de agua mediante los cuales se forman las nubes [83]. Esta propiedad permite además hacer análisis del funcionamiento del sistema de humedad implementado.

Ahora, para el sistema de generación de aerosoles en laboratorio se estudiaron diferentes métodos, entre ellos, el de atomización de una solución que contiene partículas sólidas dispersas en su interior para un posterior secado y producción de partículas sólidas; sin embargo, este método tiene baja eficiencia para partículas sólidas que siendo insolubles se aglomeran en el agua. Otro de los métodos consultados utiliza altavoces acústicos para generar aerosoles secos, sin embargo, este método no es útil para la producción de partículas pequeñas. Para una producción efectiva y de bajo costo de aerosoles secos se ha utilizado el método de fluidización, que permite una salida constante de partículas con un rango de tamaño menor a 10 micras [84] [85]

Para la implementación del método de fluidización se diseñó el recipiente que se ilustra en la Figura 29b [86] [87] [88] en el que un flujo de aire limpio y seco, generado por un bombona

de aire sintético grado 4.7 FID de Praxair, arrastra el polvo en la base del recipiente al pasar a través de la boquilla inferior 1 (Figura 29a) generando un fluido turbulento. El polvo más pesado es acelerado por el centro, pero se precipita de nuevo a través de las paredes. En la parte de arriba del embudo el flujo se vuelve laminar con un número de Reynolds pequeño $Re \leq 2300$. En este flujo laminar, las partículas con velocidad menor a la velocidad de flujo vertical escapan del embudo a través del orificio a la salida 3. Es decir:

$$V_3 \leq u_{r_{max}} \quad (59)$$

donde V_3 es la velocidad en la zona 3 (Figura 29a) y $u_{r_{max}}$ es la velocidad de sedimentación de partículas, la cual para un bajo número de Reynolds Re es:

$$u = \frac{C_g \rho_p d_p^2}{18\eta} \quad (60)$$

donde C_g es el coeficiente de Cunningham que describe el efecto del medio no continuo en el arrastre de partículas pequeñas, ρ_p es la densidad de la partícula, η es la viscosidad del fluido y d_p es el diámetro de la partícula. La velocidad en la zona 3 respecto a la velocidad en la zona 1 se encuentra utilizando la ecuación de Bernoulli y suponiendo un fluido estacionario, incompresible e irrotacional, obteniendo así:

$$V_3 = \left(\frac{D_2 D_1}{D_3 D_2} \right)^2 V_1 \quad (61)$$

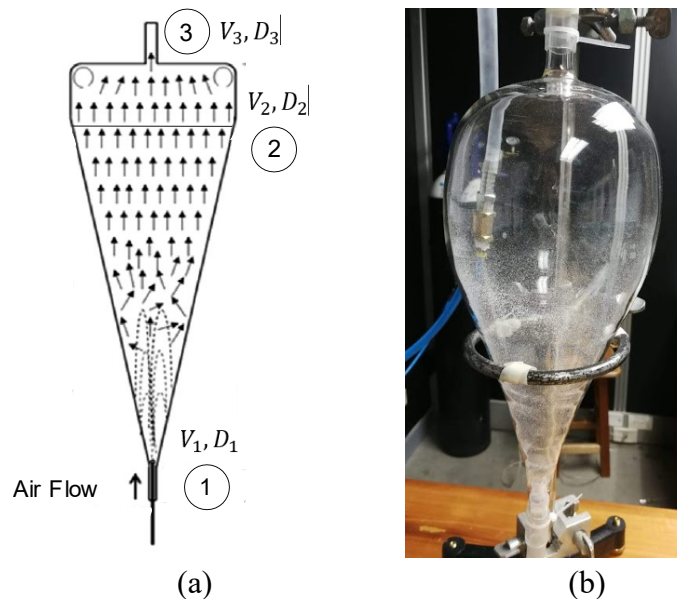


Figura 29. Fluidizador de aerosoles. a) esquema explicativo del proceso de fluidización; b) Fluidizador elaborado artesanalmente en vidrio soplado.

Además, la velocidad en la zona 1 se relaciona con el flujo volumétrico o caudal como:

$$Q = AV_1 \quad (62)$$

Con este planteamiento físico se concluye que para un flujo de 12 L/min las partículas de carbonato de calcio (como partículas de referencia) que escapan del embudo tienen una velocidad $V_3 = 0.16m/s$ que corresponden a un diámetro de partícula menor a $3.0 \mu m$.

La caracterización del sistema de generación de aerosoles se realizó utilizando el polvo de carbonato de calcio $CaCO_3$, un cilindro de gas de aire seco y un contador óptico de partículas (contador óptico de partículas Alpha sense OPC-N2 [89]). El OPC-N2 se usó para medir PM1, PM2.5 y PM10, así como la distribución del tamaño de las partículas. El flujo de entrada al generador de aerosoles se varió entre 3.0 y 15 L/min con intervalos de 1.0 L/min. Para cada uno de estos valores de flujo, durante un minuto, se midió la distribución del tamaño de partícula; a partir de estas mediciones, presentadas en la Figura 30, se corroboró experimentalmente que para un flujo de entrada de 12 L/min al dispositivo, se obtiene la mayor concentración de partículas entre 0.5 a $3.0 \mu m$.

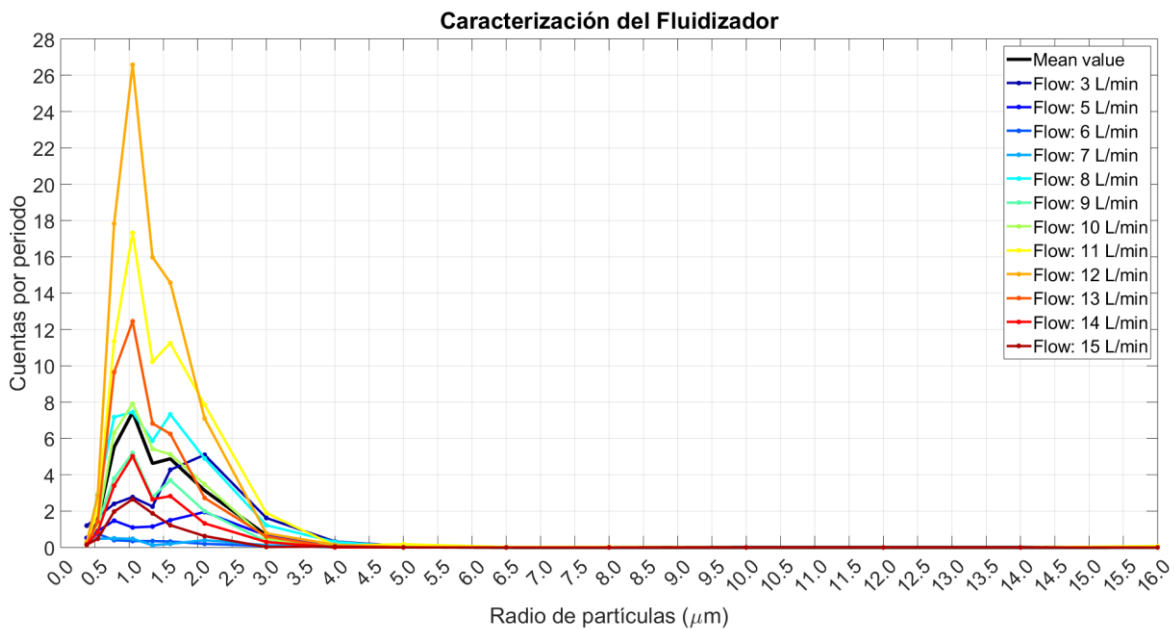


Figura 30. Distribución de tamaño de partícula a la salida del fluidizador para diferentes flujos de aire de entrada.

El contador óptico OPC-N2 se ha utilizado adicionalmente para las mediciones complementarias de caracterización de los aerosoles dentro de la cámara, para ello se desarrolló una interfaz de usuario en LabVIEW, como se muestra en la Figura 31 que permite visualizar la distribución de tamaños de partículas cada 1.4 segundos (periodo de muestreo) y la distribución de partículas promedio durante todo el tiempo de medida. Además, esta interfaz permite observar el comportamiento temporal de la concentración de PM1, PM2.5 y PM10.

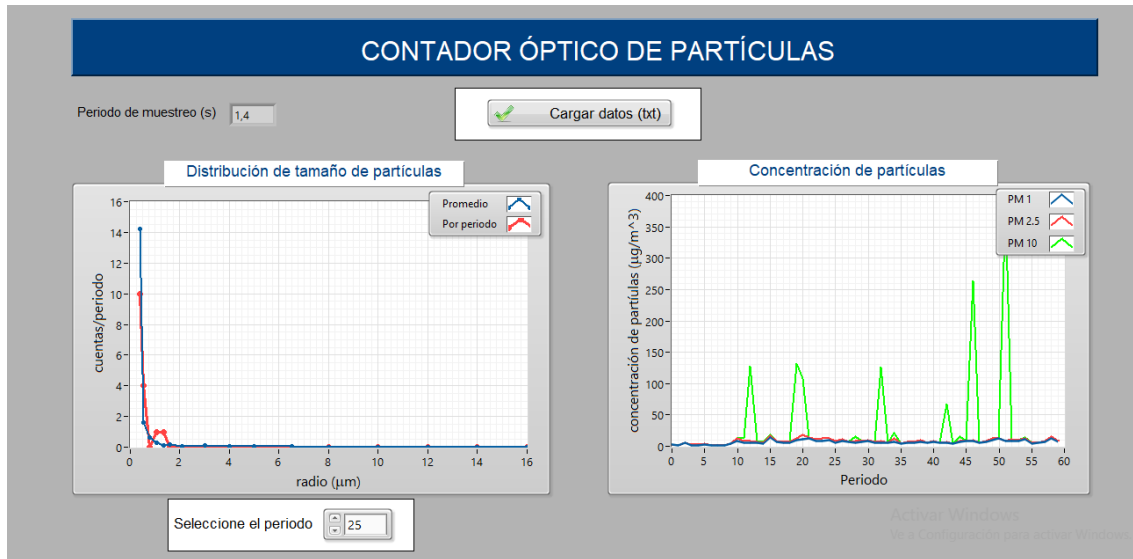


Figura 31. Interfaz de usuario realizada para la interpretación de los datos arrojados por el contador óptico de partículas.

3.2. Configuración del sistema óptico de emisión y recolección de *backscattering* de aerosoles.

La determinación de la razón lineal de despolarización producida por el *scattering* de aerosoles dentro de la cámara requiere la implementación de un sistema óptico: enviar el haz de luz polarizado linealmente que interactuará con las partículas suspendidas en el aire dentro de la cámara, recolectar la información de la luz retroesparcida y conducir esta señal hasta el divisor de haz polarizado, en el cual se divide el campo eléctrico recibido en sus componentes ortogonales.

Teniendo esto en cuenta, se estudiaron dos posibles configuraciones ópticas, las cuales se ilustran en las Figura 32 y Figura 33. Como puede observarse ambas usan la misma óptica de emisión, que consta de un láser continuo de luz cuasi-polarizada I_L de 532 nm y un polarizador a la salida del láser que garantiza la oscilación del campo eléctrico en un solo plano, a continuación, un espejo ubicado a 45° respecto al rayo lo desvía hacia el interior de la cámara, denotada como F de acuerdo con el modelo matemático descrito en la sección 2.3.1. La diferencia entre los montajes radica en la óptica de recolección: El primero (Figura 32) usa un sistema reflector como el telescopio Cassegrain, mientras que el segundo sistema (Figura 33), recoge la luz retroesparcida usando un sistema refractor en el cual una lente L1 se encarga de recolectar y enfocar los rayos, y una segunda lente L2 colima los rayos del primer plano focal formado por L1. Finalmente, ambos sistemas envían los rayos paralelos hacia un cubo divisor de haz polarizado (PBS) que separa el campo en sus componentes

paralela y perpendicular, y cuyas intensidades son captadas por tubos fotomultiplicadores (PMT) como fotosensores.

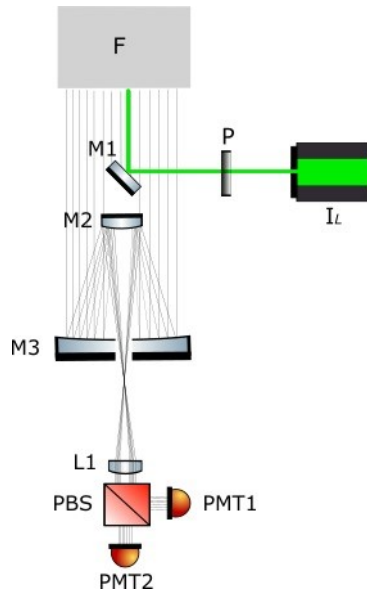


Figura 32. Sistema reflector de recolección de backscattering

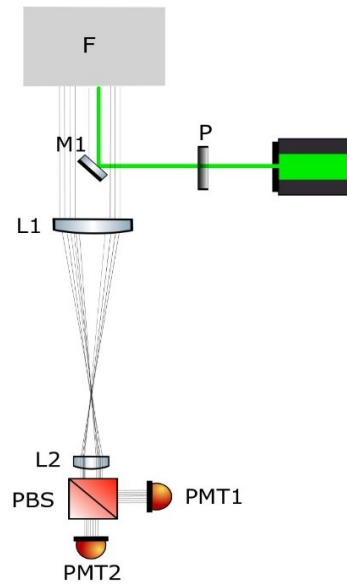


Figura 33. Sistema refractor de recolección de backscattering

Para elegir el sistema más adecuado se consideró la disponibilidad de elementos ópticos en el laboratorio de Óptica y Fotónica de la Universidad EAFIT y la efectividad de la recolección de luz. Se determinó que el sistema reflector podía recuperar mayor cantidad de luz que el refractor debido a que en las lentes se presentan mayores pérdidas por atenuación que en los espejos, además, el tamaño del espejo primario permitía recuperar gran cantidad de luz. Sin embargo, el diámetro del espejo secundario M2 y su posición coaxial con el rayo emitido produce obstrucción total de la luz. Por otra parte, para el sistema refractor se pueden compensar las pérdidas por refracción aumentando la potencia de emisión del láser y ajustando la sensibilidad de los fotomultiplicadores.

La ventaja de esta configuración es que permite un montaje de pequeñas dimensiones adecuado al espacio disponible, además, el espejo M1 puede ser suficientemente pequeño de tal forma que la obstrucción a la luz retroesparcida sea mínima. Por lo tanto, se eligió como sistema recolector de *backscattering* el sistema refractor, como se muestra en el montaje final que se presenta en la Figura 34 y que tiene las características que se muestran en la Tabla 4.

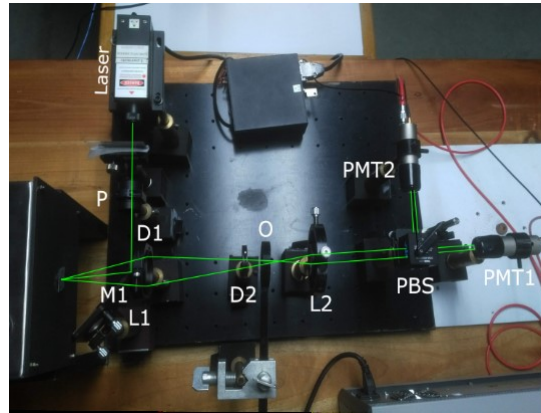


Figura 34. Fotografía del montaje óptico de emisión y recolección de *backscattering*.

Tabla 4. Características técnicas del sistema óptico de recolección.

| Elemento | Referencia |
|--|---|
| Laser de onda continua | 532nm, 114mW, Lasermate GMLN532-100FED |
| P: Polarizador lineal | LPVISA100 |
| M1: Espejo plano | Espejo de primera superficie de 5.0 x 5.0 mm |
| V1: Ventana de vidrio inclinada 5° respecto al haz incidente | Montura diseñada en Solid Edge e impresa 3D |
| A: Cavidad absorbente de luz | Montura diseñada en Solid Edge e impresa 3D |
| L1: Lente plano-convexa colectora | f=125mm 2" LA1384-A-ML Thorlabs |
| L2: Lente plano-convexa colimadora | f=50mm 2" Lente colectada de una cámara fotográfica. |
| PBS: Divisor de haz polarizado | CCM1-PBS25-532 |
| PMT: Tubos fotomultiplicadores | Photomultiplier Module R9880U Licel PM-HV |
| D1: Diafragma en la primera lente 1 | $d_{int} = 20.7mm$ Diseñado en Solid Edge e impreso 3D |
| D2: Diafragma de apertura 2 | $d = 7.0 mm$ Diseñado en Solid Edge e impreso 3D |
| O: Obstrucción de luz | $d = 1.0 mm$ Diseñado en Solid Edge cortado con láser en acrílico negro. |

En esta configuración experimental, el haz de luz polarizado linealmente emitido por el láser de longitud de onda 532.2 nm (de acuerdo con el espectro mostrado en la Figura 35) es enviado al interior de la cámara por reflexión en M1 y a través de V1, que se encuentra inclinado 5° respecto al haz incidente para evitar la detección por los fotomultiplicadores de la reflexión en el vidrio V1.

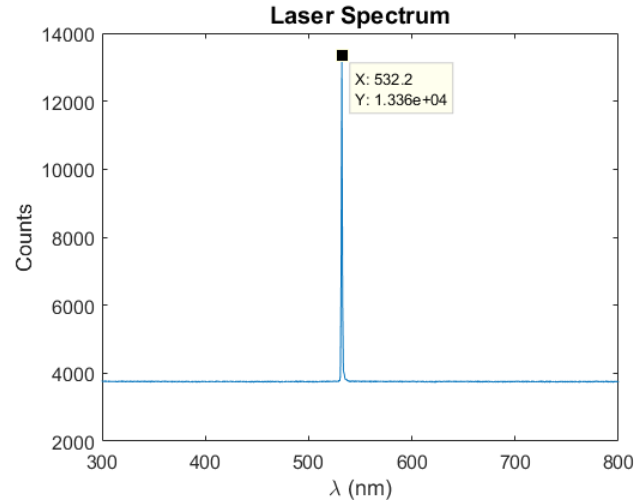


Figura 35. Espectro del laser de onda continua Lasermate GMLN532-100FED.

Para el sistema refractor recolector se realizó el análisis geométrico que se muestra en la Figura 36, y para el cual se asumió que la mayor cantidad de *scattering* por aerosoles es producido en el centro de la cámara. Bajo esta suposición y siendo el diámetro de la apertura de entrada a la cámara de $\phi = 15 \text{ mm}$, sobre la lente L1 ubicada a 95 mm de distancia se forma un disco de Airy de $h = 20.7 \text{ mm}$ según la ecuación (65), y el valor óptimo del campo de visión para la lente usada de diámetro $2'' = 50.8 \text{ mm}$ es $\alpha = 1.72^\circ$, garantizando la eliminación de los efectos de diatenuación sobre los bordes de la lente como se muestra en la sección 3.2.1. A continuación, la luz es enfocada a $s_i = 196.2 \text{ mm}$ desde L1 según la ecuación (66), finalmente se ubica una segunda lente L2 a $f = 50 \text{ mm}$ para colimar los rayos de luz con un diámetro $h_2 = 2.6 \text{ mm}$ y garantizar un área de iluminación menor al área sensible de detección de los fotosensores ($d = 9 \text{ mm}$).

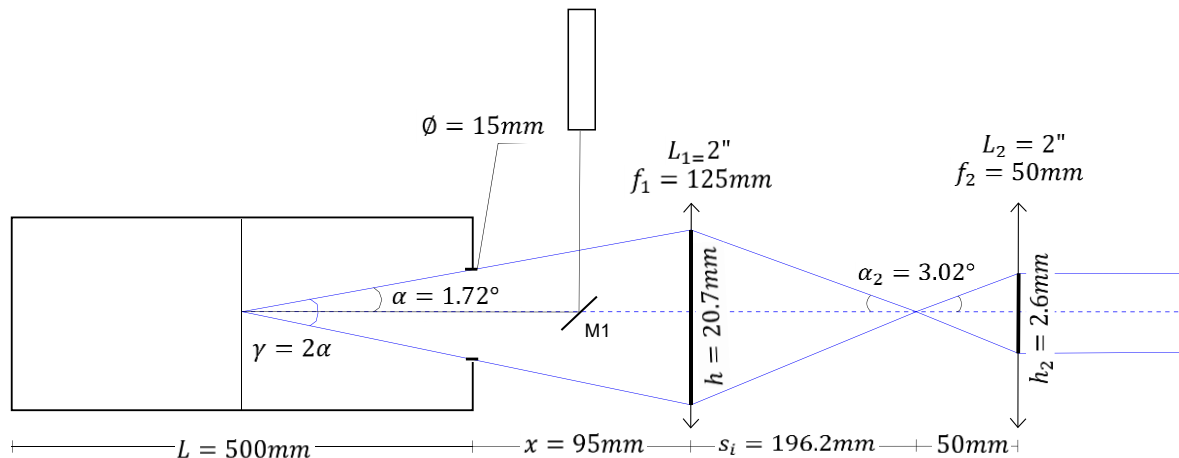


Figura 36. Análisis geométrico del sistema refractor de recolección de luz retroesparcida

$$\alpha = \tan^{-1} \frac{\phi}{L} \quad (63)$$

$$\gamma = 2\alpha \quad (64)$$

$$h = 2 \tan \alpha \left(\frac{L}{2} + x \right) \quad (65)$$

$$s_i = \frac{f s_o}{s_o - f} \quad (66)$$

El sistema de recolección de luz retroesparcida se diseñó para garantizar que solo la luz esparcida dentro de la cámara sea detectada por los fotosensores, como se presenta en la Figura 37a. Si una partícula por fuera de la cámara produjera esparcimiento entre L1 y la entrada de la cámara, para ángulos de esparcimiento pequeños la señal será obstaculizada por M1 mientras que para ángulos mayores, la señal será bloqueada por la apertura D2 (Figura 37b). Si la señal de luz retroesparcida se genera por fuera de la cámara en la zona de la cara posterior, esta luz es enfocada por L1 después de la apertura D2 y es obstruida por una máscara física como se ilustra en la Figura 37c.

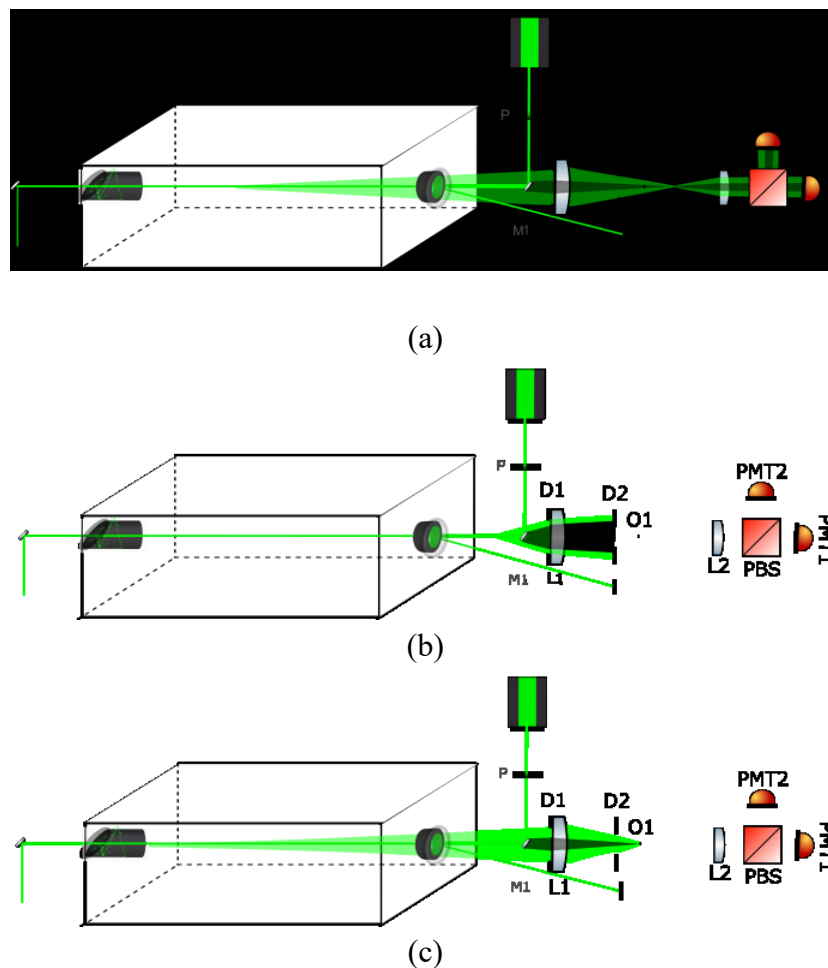


Figura 37. Funcionamiento del diseño óptico del sistema de recolección de luz retroesparcida, a) Si el *scattering* se produce dentro de la cámara, b) si el *scattering* se produce entre L1 y la entrada de la cámara, c) si hay reflexiones en la cara posterior de la cámara.

3.2.1 Análisis de los efectos de los elementos ópticos sobre la polarización de la luz.

La información obtenida a partir de la luz recolectada por el sistema óptico anteriormente descrito (sección 3.2) no solo contiene los cambios introducidos en la luz debido a los aerosoles dentro de la cámara, sino también a los elementos ópticos que producen errores sistemáticos en la medida e incluso, cambios en la polarización que podrían ser mayores a los producidos por el *scattering*.

Para estudiar las contribuciones individuales de los elementos ópticos se realizó la simulación de la señal utilizando el trazado de rayos de polarización en OpticStudio y, además, un análisis experimental. OpticStudio es el software que permite evaluar los vectores de Jones ortogonales para cada punto de una malla discreta de la pupila de salida del sistema y de los elementos individuales brindando información de las amplitudes del campo eléctrico y el retardo relativo, información suficiente para establecer las fluctuaciones locales entre las componentes y, por ende, la diatenuación, retardancia y los elementos de la matriz F .

Los resultados para cuantificar los efectos de diatenuación y retardancia por refracción (lentes) se muestran en las Figura 38 y Figura 39, mientras que por reflexión (espejos), se presentan en la Figura 40 y Figura 41

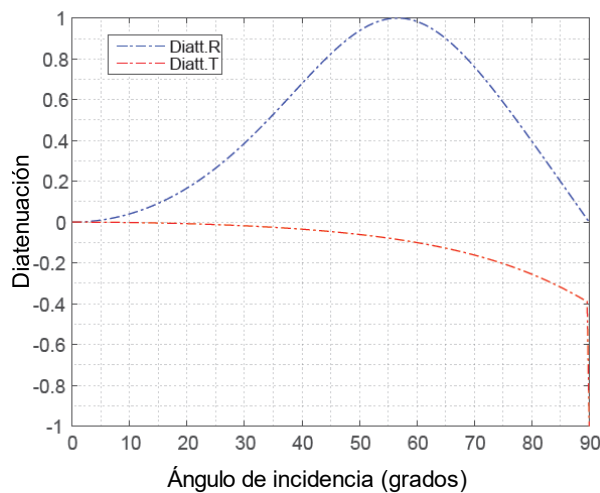


Figura 38. Diatenuación por refracción respecto al ángulo de incidencia de la luz

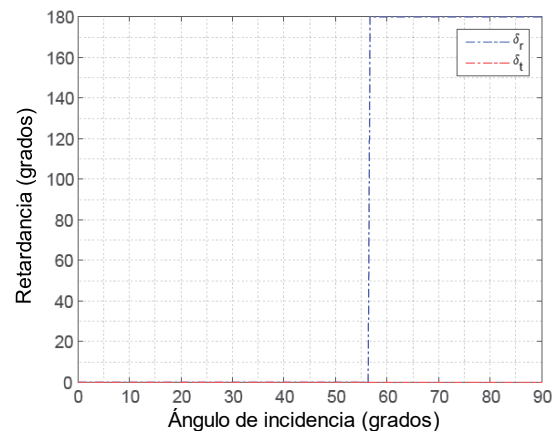


Figura 39. Retardancia por refracción respecto al ángulo de incidencia de la luz

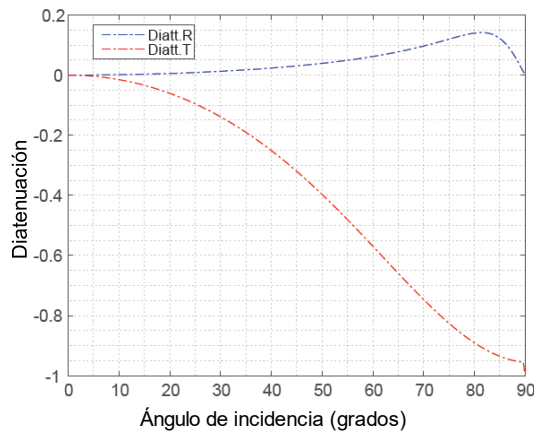


Figura 40. Diatenuación por reflexión respecto al ángulo de incidencia.

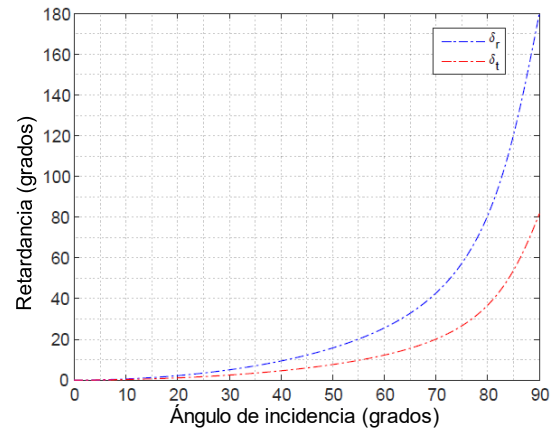


Figura 41. Retardancia por reflexión respecto al ángulo de incidencia de la luz

Como se observa, el efecto de la incidencia no normal a la superficie genera la aparición de un estado de polarización diferente. Lo que indica que una mala alineación de las lentes y espejos en el montaje puede causar efectos no deseados en la polarización. También se observa que los efectos por diatenuación son más agudos en elementos refractivos que reflectivos, mientras que por retardancia, son más evidentes en elementos reflectivos.

Se simuló también la despolarización en la pupila de salida del sistema de lentes y espejos de la Figura 36 y el resultado se muestra en la Figura 42. Como se observa, los mayores cambios se reflejan en los bordes de la pupila formando un patrón en forma de cruz. Sin embargo, la variación máxima corresponde al orden de 10^{-4} , con lo que puede concluirse que no hay cambios representativos debido a los elementos ópticos utilizados en el montaje experimental.

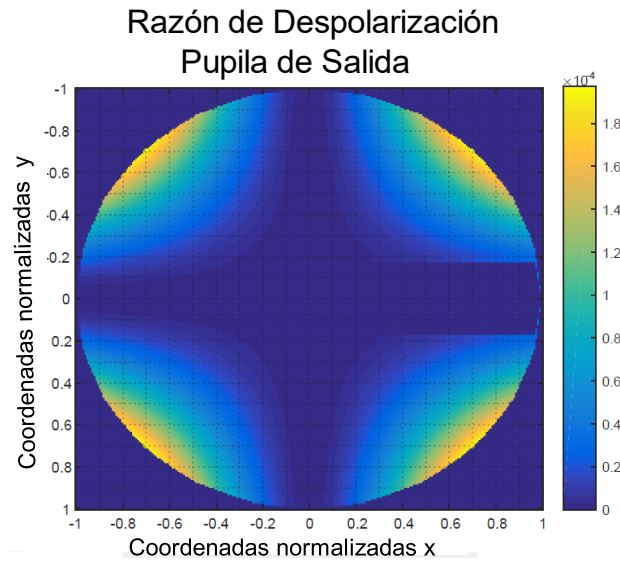


Figura 42. Despolarización en la pupila de salida del sistema

El análisis experimental se desarrolló para determinar la despolarización de la luz en cada uno de los elementos ópticos, independientemente de la longitud de onda. Para esto, se usa una fuente de baja coherencia y amplio espectro, denotada como S en la Figura 43. Las ondas de luz emitidas por esta fuente pasan a través de un iluminador de Köhler que garantiza una iluminación uniforme y luego, a través de dos polarizadores cruzados P1 y P2.

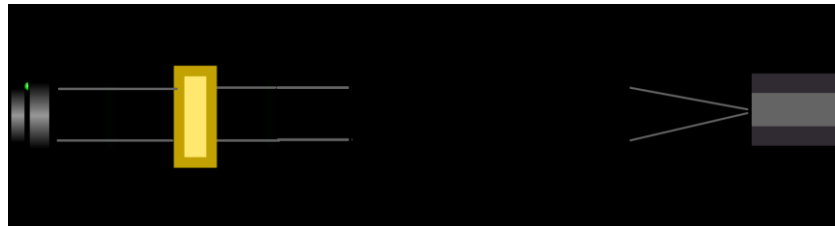


Figura 43. Montaje de polarizadores cruzados para determinar la despolarización en elementos ópticos usando una fuente de baja coherencia y amplio espectro.

El primer polarizador se usa para obtener el estado de polarización vertical de la fuente. El segundo polarizador se ubica rotado 90° de modo que, si no hay ningún elemento que despolarice, teóricamente, no habría señal a la salida. Los elementos ópticos que desean analizarse se ubican entre P1 y P2, así cualquier componente del campo que altere el estado vertical inicial, será detectado por la cámara CCD.

Los resultados obtenidos para una lente de Phywe (parte a), una lente de plástico (parte b) y una lente de Thorlabs (parte c) se presentan en la Figura 44. Como se observa, el material de la lente influye significativamente en la despolarización de la luz, por lo tanto, se eligieron

lentes de Thorlabs para eliminar completamente cualquier efecto de este elemento óptico sobre la polarización de la luz.

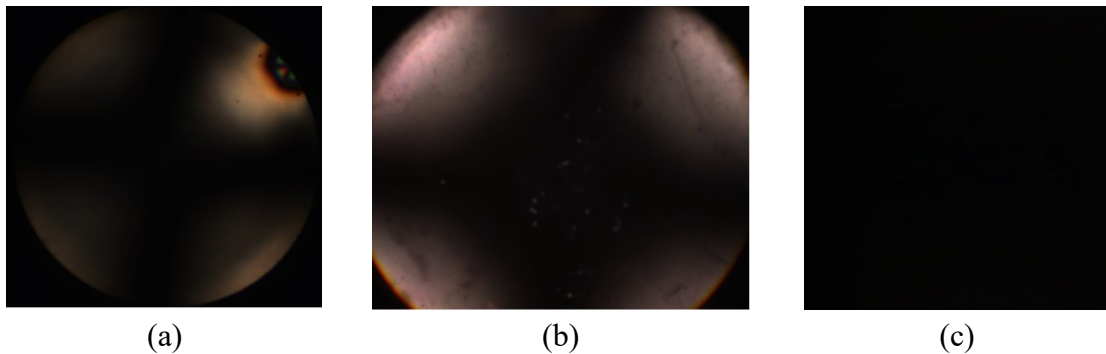


Figura 44. Despolarización en lentes: a) Lente de Phywe, b) Lente de plástico, c) Lente LA1384-A-ML thorlabs 2''

A partir de este estudio se concluye que los efectos despolarizantes en lentes, vidrios y espejos presentes en el montaje óptico no son representativos, siempre y cuando haya una alineación adecuada, es decir, los elementos ópticos no superen los 10° de inclinación y se elijan lentes de material y fabricación adecuados.

3.2.2. Calibración del sistema

Conocidos los efectos individuales de la óptica, es necesario aplicar un método de calibración que elimine los errores del sistema completo, de modo que se pueda obtener el valor de la razón lineal de despolarización equivalente debido únicamente a las partículas. Para corregir estos efectos, se implementó el método de calibración $\Delta 90$ introducido por F. Volker [14] descrito en la 2.5 del capítulo 2 de este trabajo, en el que se usa un polarizador lineal como calibrador ubicado entre la lente colimadora y el divisor de haz polarizado (PBS) como se indica en la Figura 45.

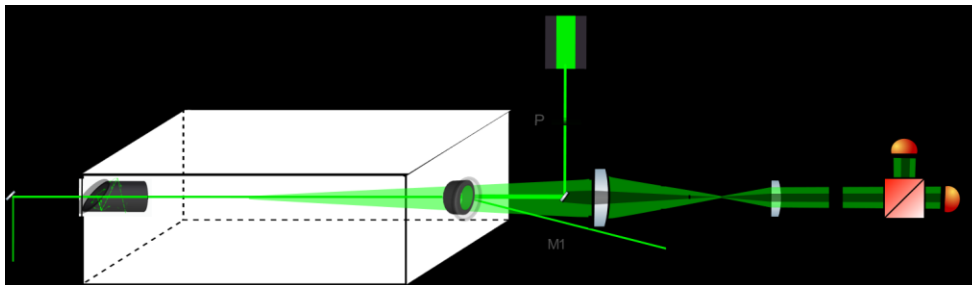


Figura 45. Ubicación del calibrador (polarizador lineal) dentro del montaje óptico implementado.

La implementación del método requiere que el polarizador se rote a $+45^\circ$ y -45° respecto al eje rápido de transmisión de la luz. Para cada una de estas posiciones se realizan

mediciones con las mismas condiciones de ruido de fondo, y con valores iniciales de humedad relativa del aire y temperatura de $59\% \pm 4.5\%$ y $22^\circ\text{C} \pm 2\%$ respectivamente. Estas señales se denotan como $I_R(+45^\circ)$, $I_T(+45^\circ)$, $I_R(-45^\circ)$, $I_T(-45^\circ)$ de acuerdo con la notación del método $\Delta 90$. Finalmente, la razón lineal de despolarización se obtiene siguiendo el procedimiento que se resume en el flujograma de la Figura 46.

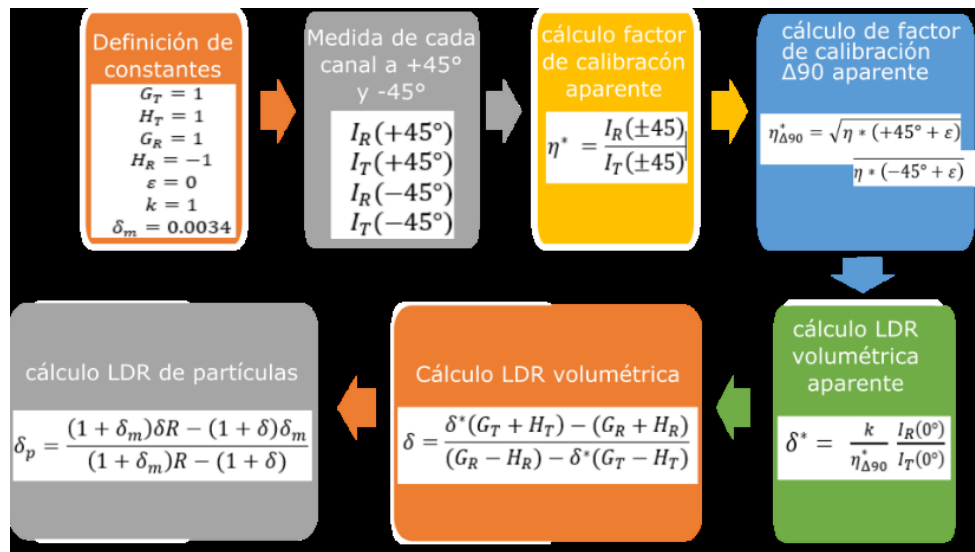


Figura 46. Método de calibración para el cálculo de la razón lineal de despolarización volumétrica y de partículas.

Las constantes G_T , H_T , G_R y H_R , que describen la mezcla de señales reflejadas y transmitidas en los componentes ópticos se establecieron con un valor constante e ideal [14], dado que para el montaje óptico de este trabajo la componente de polarización paralela del láser es detectada en el canal transmitido del PBS (i.e. $y = 1$). Además, como se ha mostrado en la sección 3.2.1, las lentes y los espejos utilizados no introducen cambios significativos por diatenuación ni despolarización. Por otra parte, la configuración óptica se diseñó para que la luz no pase por los bordes de la lente y así anular completamente las aberraciones de polarización. En el montaje experimental no se presentan rotaciones mecánicas del PBS por ello se fija $\varepsilon = 0$. La razón de despolarización lineal de moléculas se ha obtenido desde la literatura y establecido en $\delta_m = 0.0034$ [90]. El valor de la razón de *backscatter* R depende del tipo de aerosol y el procedimiento de cálculo se describe en el capítulo 4, sección 4.4.

3.3. Montaje experimental integrado

Una vez implementados y caracterizados los sistemas de control de humedad relativa y temperatura del aire dentro de la cámara, el sistema de producción de aerosoles y el sistema óptico de envío de la luz láser a la cámara y de recolección y detección de la señal de

backscattering, se integraron para obtener un montaje funcional como se muestra en el esquema de la Figura 47.

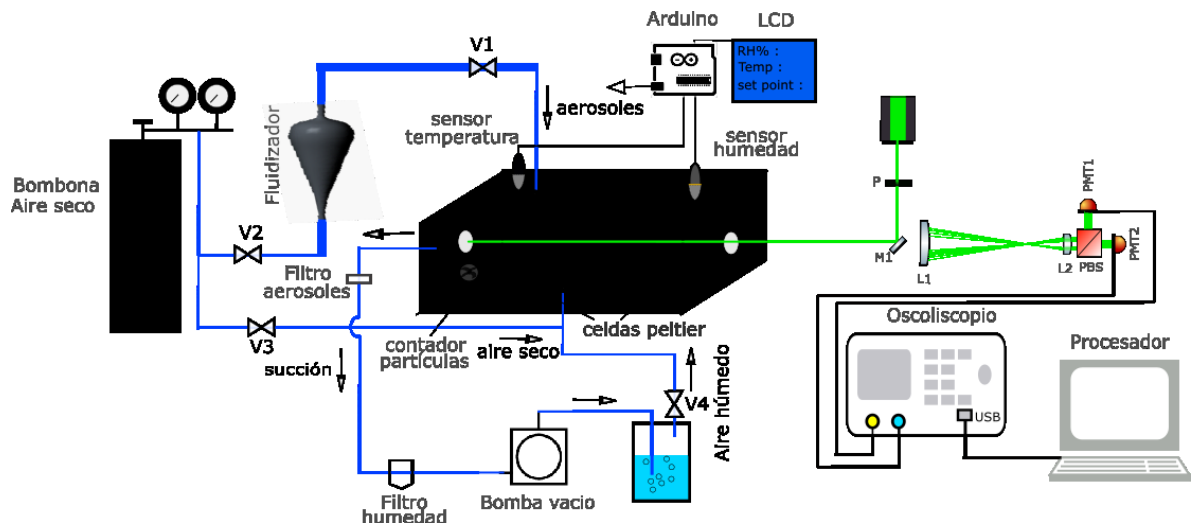


Figura 47. Montaje experimental para la medición de la despolarización de partículas por *backscattering*.

En este montaje, los aerosoles ingresan a la cámara de acero inoxidable a 12 L/min por la cara superior mientras que por la cara inferior ingresa aire seco libre de aerosoles a 12 L/min para producir una mezcla homogénea dentro de la cavidad, al mismo tiempo una bomba de vacío conectada a un filtro de humedad extrae aire a razón de 13 L/min desde la cámara para generar un flujo continuo dentro de la misma. Los sensores de humedad relativa y temperatura, conectados a una pantalla LCD, están instalados en la cara superior de la cámara, el aire húmedo es transportado desde un recipiente con agua hacia la cámara, empujado por una bomba de aire y la temperatura es aumentada o disminuida a través de las celdas Peltier instaladas en la cara inferior de la cámara.

Finalmente, un sistema óptico envía el haz de luz continuo, monocromático y polarizado linealmente hacia el interior de la cámara y adicionalmente, se recoge la luz retroesparcida desde el interior de la cámara por los aerosoles, midiendo la intensidad de las componentes paralela y perpendicular del campo después de la interacción con dichas partículas a través del sistema óptico de detección. La información registrada en el osciloscopio es enviada al computador y procesada para obtener la información de la razón lineal de despolarización de las partículas.

El uso del montaje anteriormente descrito ha requerido el desarrollo e implementación del protocolo de trabajo que se describe a continuación:

1. Preparar la bitácora del experimento.
2. Realizar la limpieza del interior de la cámara.
3. Revisar la carga del fluidizador.
4. Revisar la alineación del sistema óptico y eliminar fuentes de luz parásitas.
5. Configurar el osciloscopio en *invert on*, escala 200mV, doble canal y conectarlo al computador.
6. Abrir el programa de control del osciloscopio *OscillospeGraph.m* dentro de la carpeta *ReadOscilloscope* y configurar la ubicación donde se desean guardar los archivos. Se recomienda cerrar todas las ventanas posibles del computador, para asegurar el máximo rendimiento del código.
7. Hacer una prueba de comunicación entre el osciloscopio y el computador.
8. Con la luz apagada, encender la fuente de alimentación de los tubos fotomultiplicadores, fijar el voltaje en 450 V y retirar los protectores de los fotosensores.
9. Conectar el módulo de control de humedad y temperatura, abrir la comunicación serial del programa *CompleteControl.ino* para obtener datos de humedad y temperatura del experimento.
10. Activar las mediciones en el contador de partículas y registrar la hora de inicio y finalización.
11. Medir ruido de fondo: Cerrar las válvulas de entrada de aerosoles y de aire húmedo, encender la bomba extractora e inyectar aire seco y limpio.
12. Medir las señales de retroesparcimiento en los canales 1 y 2, que se corresponden con la luz transmitida y reflejada en el PBS.

Una vez transferidos los archivos de medida desde el osciloscopio al computador, se grafican las señales crudas tanto de ruido de fondo como de señal. Seguidamente, se elimina el ruido electrónico usando un filtro de Fourier y se extrae el ruido de fondo de la señal para obtener la información que corresponde únicamente al *scattering* de partículas y moléculas dentro de la cámara. A la señal de *scattering* procesada, se aplica el método $\Delta 90$ para eliminar los efectos despolarizantes de la óptica (sección 3.2) para obtener finalmente la LDR de partículas. En resumen, el proceso de adquisición y procesamiento de las mediciones se presenta en la Figura 48.



Figura 48. Proceso resumido para la obtención de la razón lineal de despolarización de aerosoles dentro de la cámara en condiciones de laboratorio.

Finalmente, se realizó una simulación del *scattering* por partículas utilizando el software MOPSMAP [25] descrito en el Capítulo 2, Sección 2.6 para compuesto de carbonato de calcio y polvo del Sahara. Los parámetros de entrada y las propiedades ópticas obtenidas se presentan en el capítulo Resultados

Capítulo 4

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En esta sección se presentan los valores obtenidos para la razón lineal de despolarización volumétrica δ_v y la razón lineal de despolarización de partículas δ_p para aerosoles de carbonato de calcio, un componente importante en la química atmosférica del Valle de Aburrá y de polvo del desierto del Sahara. Estos estudios hacen factible realizar comparaciones con la literatura para verificar la calibración del sistema. Estos valores se han obtenido haciendo seguimiento y control de variables como la humedad relativa del aire dentro del volumen de la cámara utilizada, la concentración de partículas en el rango PM2.5, la distribución de tamaño y la intensidad de *backscattering* para $\lambda = 532 \text{ nm}$. Estas variables se analizan de forma simultánea en cada experimento para observar su efecto sobre los valores de la razón lineal de despolarización LDR o δ .

El orden de este capítulo es el siguiente: Primero se realiza un análisis de ruido electrónico y ruido de fondo del sistema, posteriormente, se describe el método de procesamiento de las señales crudas u obtenidas directamente por los fotosensores para disponer de señales aptas para aplicar el método $\Delta 90$ una vez encontrado el valor de corrección para los elementos ópticos utilizados en el sistema de medida. Finalmente, se encuentran los valores de δ y se analizan en conjunto con medidas de humedad relativa, concentración de partículas y distribución de tamaño para cada uno de los experimentos realizados.

4.1. Análisis de ruido en el sistema

En la Figura 49 se muestra el valor promedio de ruido electrónico registrado en los fotomultiplicadores PMT para diferentes voltajes de alimentación con su respectiva barra de error, indicando el rango de valores máximos y mínimos obtenidos. Se observa que tanto el valor promedio de la intensidad de la señal de ruido electrónico como la barra de error son invariantes con el aumento del voltaje de alimentación, dado que todos los valores se contienen en un rango de 0.013 V.

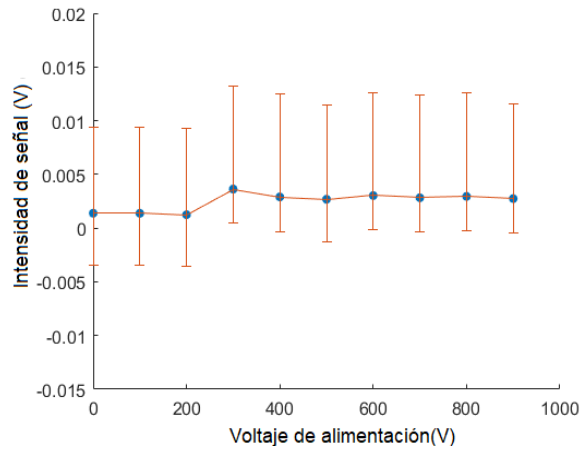


Figura 49. Ruido electrónico para diferentes voltajes de alimentación.

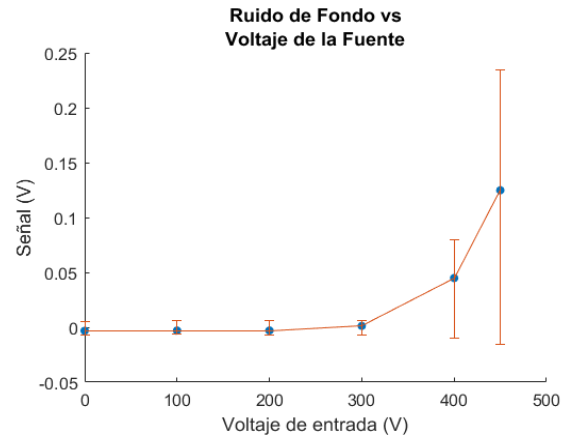


Figura 50. Ruido de fondo con láser encendido para diferentes voltajes de alimentación.

dado que el voltaje de alimentación de los PMT's no tiene influencia en el ruido electrónico, se procede a analizar el ruido de fondo, que corresponde a luz parásita proveniente del láser u otras fuentes dentro del laboratorio no relacionadas con el *scattering* por aerosoles. Este ruido se analizó para voltajes de la fuente entre 0 y 500 V, los resultados se muestran en la Figura 50.

A partir de los resultados obtenidos para el ruido de fondo en el sistema experimental se observa que el voltaje de activación de los PMT's es de 300 V, se eligió un voltaje de trabajo de 450 V de tal forma que se obtuviera buena sensibilidad en la detección y no implicara riesgo de daño de los fotosensores por señales aleatorias de alta intensidad.

Una vez determinado el voltaje de trabajo para los fotosensores, se realizaron diversas mediciones de ruido de fondo para las cuales no sólo se intenta eliminar cualquier fuente de luz parásita que pueda ser detectada por los fotosensores, sino que además se utiliza un flujo de aire limpio circulando dentro de la cámara, los resultados se muestran en la Figura 51, donde se presenta por primera vez la notación CH1 y CH2, etiquetas asociadas a la intensidad de la señal registrada por el PMT 1 (intensidad transmitida en el PBS) y por el PMT 2 (intensidad reflejada en el PBS), respectivamente.

La Figura 51 muestra como las señales de ruido de fondo son normalmente constantes en el tiempo, sin embargo, este análisis permite alertar sobre perturbaciones en el estado inicial del sistema, como indica la señal correspondiente a la etiqueta 'CH1 Exp4' asociada a partículas en suspensión dentro de la cámara. Se observa además que para cada experimento las señales de ruido de fondo presentan amplitudes distintas, debido a luz adicional como

pantallas de ordenador, confirmando la importancia de medir la señal de ruido de fondo para cada experimento llevado a cabo.

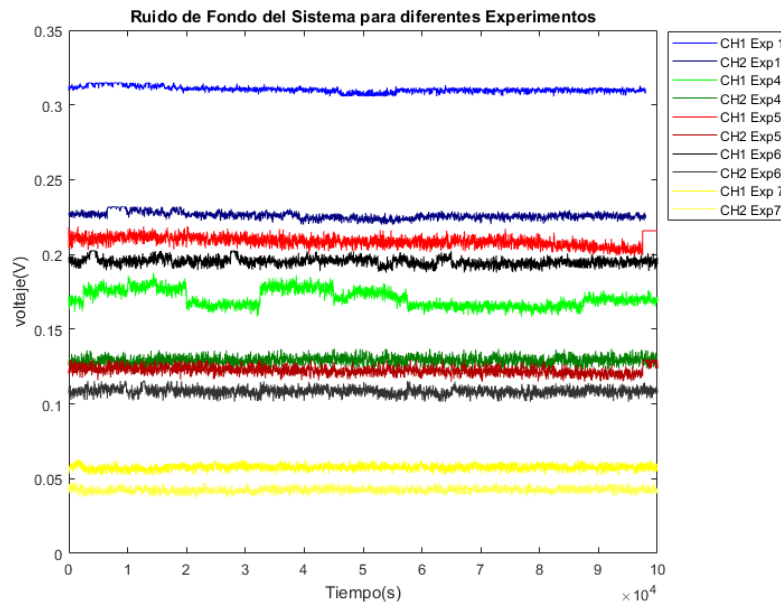


Figura 51. Medidas de Ruido de fondo para diferentes días.

4.2. Procesamiento de la Señal

Utilizando el protocolo de medida descrito en el Capítulo 3, Sección 3.3, una vez medido el ruido de fondo en el sistema, se procede a ingresar aerosoles a la cámara y a medir la señal de retroesparcimiento producida por estas partículas en los canales 1 y 2, que corresponden a la luz transmitida y reflejada en el PBS. El procesamiento de las señales obtenidas se ilustra en la Figura 52. En la Figura 52a, se presentan las señales puras o ‘en bruto’ obtenidas directamente desde el osciloscopio, posteriormente, se calcula la transformada de Fourier (Figura 52b) y se eliminan en el espectro de Fourier aquellas frecuencias correspondientes al ruido, que se encuentran en el rango entre $1.42 \times 10^4 \text{ Hz}$ y $5.0 \times 10^5 \text{ Hz}$. A continuación, se calcula la transformada inversa de Fourier para obtener las señales filtradas (Figura 52c). Finalmente, se realiza la operación: intensidad de la señal menos ruido, para obtener los datos correspondientes sólo al retroesparcimiento debido a los aerosoles (Figura 52d).

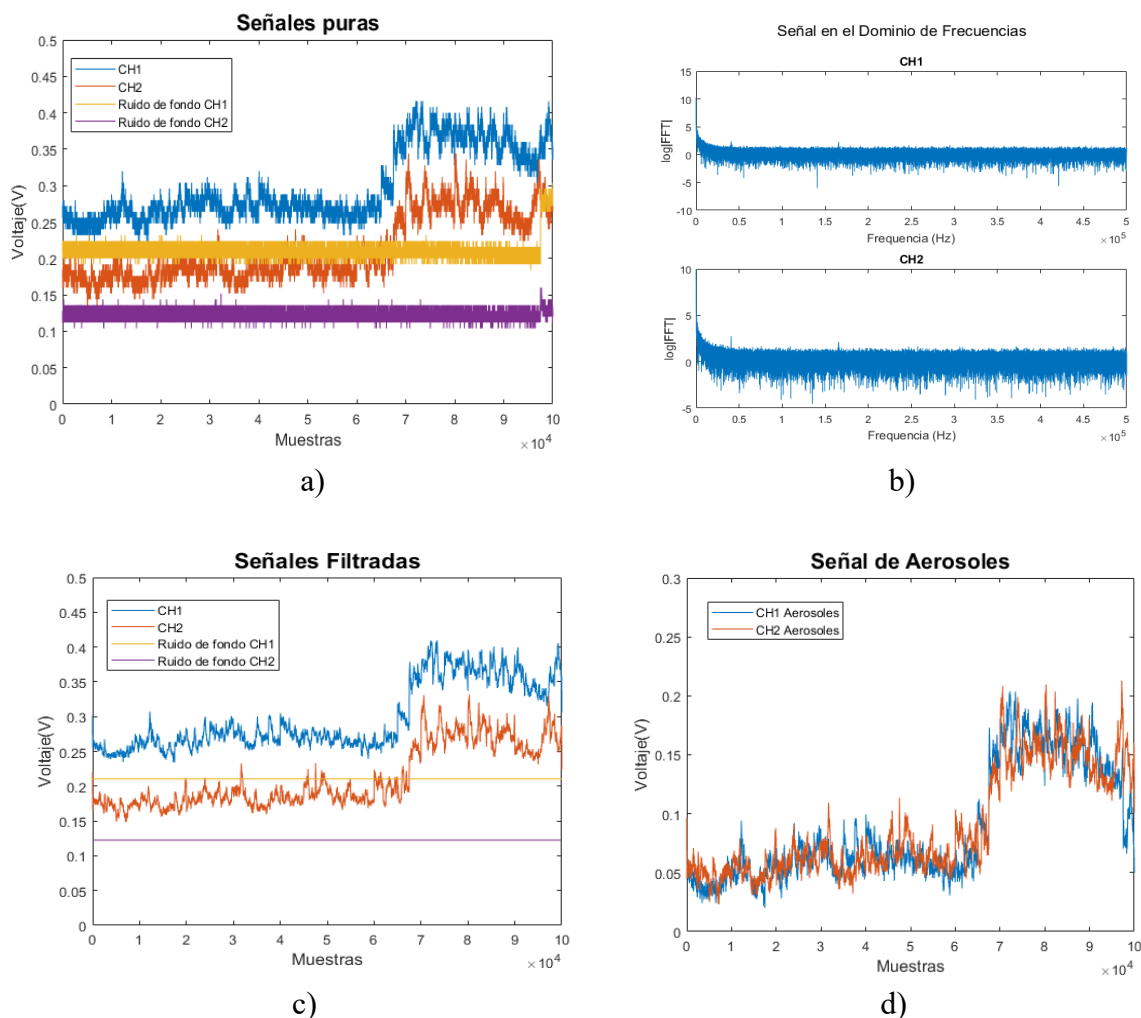


Figura 52. Procesamiento de señales. a) señales crudas, b) señales en el dominio de las frecuencias, c) señales filtradas usando la transformada de Fourier, y d) Señal de aerosoles, obtenida de la operación *señal filtrada* – *ruido de fondo*.

4.3. Calibración del sistema para las señales de despolarización por *backscattering*.

Como se describió en el Capítulo 3, el error introducido por los elementos ópticos del sistema experimental es fundamental para el cálculo de la razón lineal de despolarización δ , para ello, se realiza la calibración del sistema utilizando el método $\Delta 90$ expuesto en el Capítulo 2, sección 2.5 y en el Capítulo 3, sección 3.2.2. A partir de la aplicación de este método se encontraron los factores de calibración $\eta_{\Delta 90}$ para diferentes valores de humedad relativa HR dentro de la cámara y una concentración de partículas menor a $4.0 \mu\text{g}/\text{cm}^3$, indicando un ambiente limpio. Los resultados obtenidos se presentan en la Figura 53.

La Figura 53a muestra la evolución de la HR dentro de la cámara durante el tiempo de medida para un rango de valores entre 30% y 70%, también se muestra el valor de voltaje correspondiente a la intensidad de *backscattering* para las rotaciones del calibrador a $+45^\circ$ y

-45° [i.e. $\eta(+45^\circ)$, $\eta(-45^\circ)$] para cada uno de los canales de medición y finalmente, los valores del factor de calibración $\eta\Delta 90$. La Figura 53b muestra los valores del factor $\eta\Delta 90$ obtenidos para un rango de HR comprendido entre 70% y 90%, y la Figura 53c los determinados para valores de HR mayores que 90%.

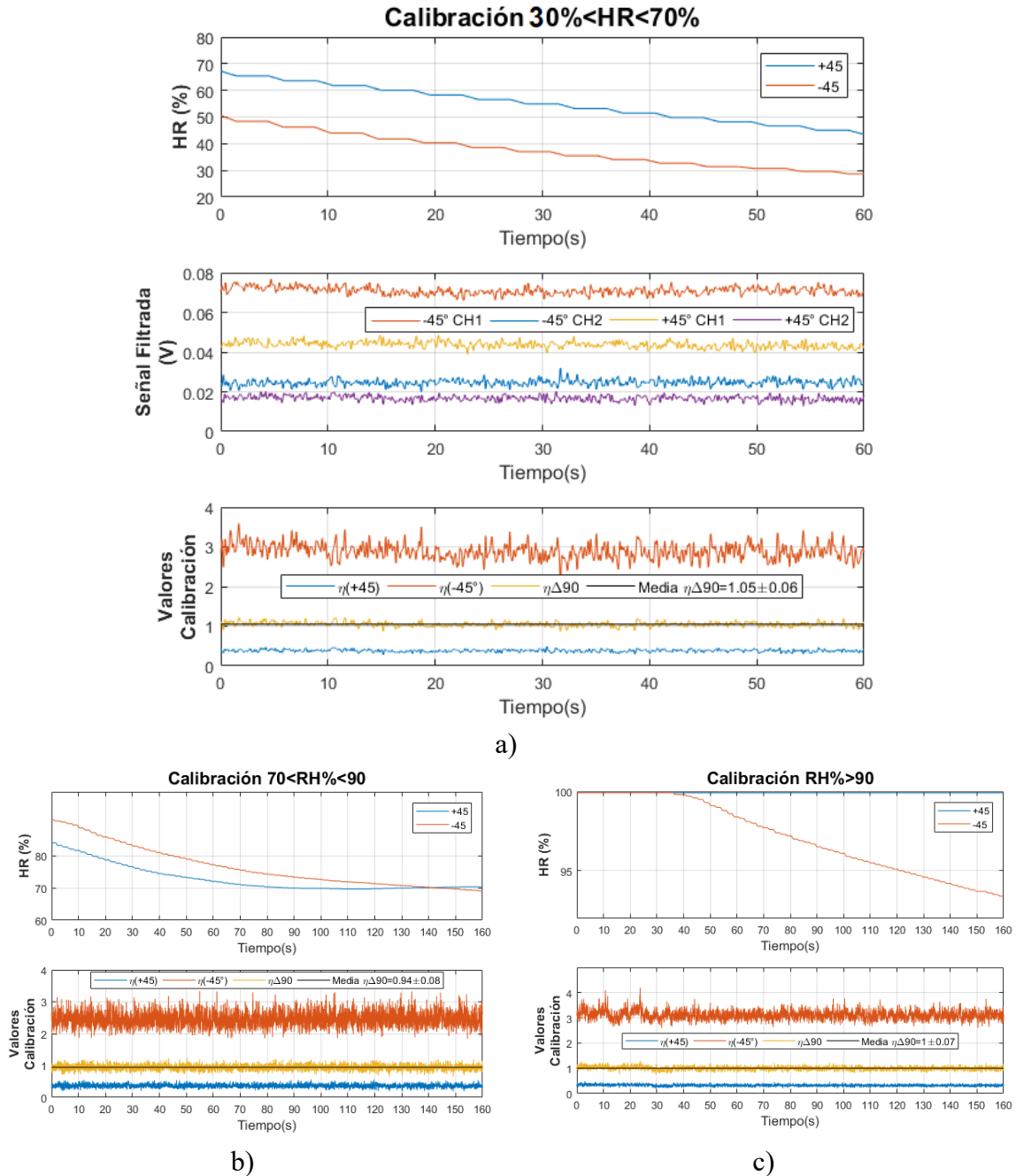


Figura 53. Mediciones de calibración de las señales de *backscattering* para:
a) $30\% < HR < 70\%$, b) $70\% < HR < 90\%$, c) $HR > 90\%$

De los resultados obtenidos durante la aplicación de la calibración de las señales de *backscattering* en el sistema de medición para diferentes valores de la HR se determinaron

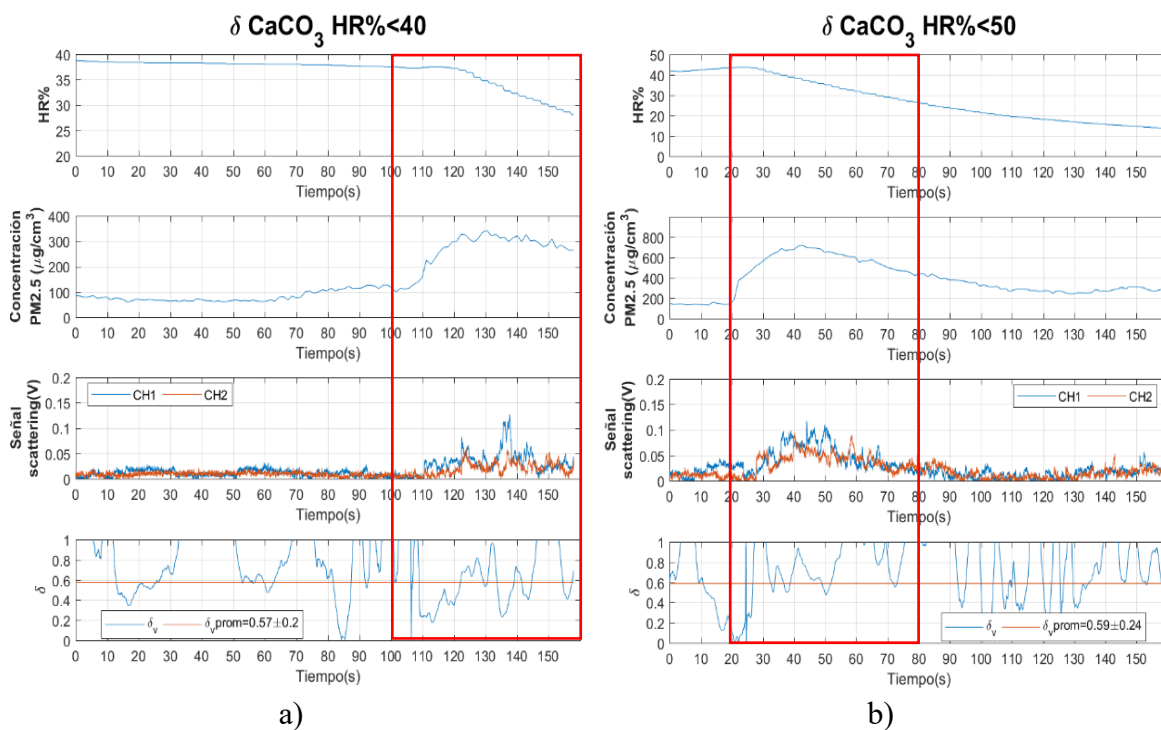
los factores de calibración $\eta\Delta 90$ que se sintetizan en la Tabla 5. Se observa que bajo las condiciones establecidas para las mediciones dentro del laboratorio, no se producen cambios significativos en el valor promedio del factor de calibración $\eta\Delta 90$ debido a las variaciones en la humedad relativa del aire. Además, en estas condiciones, el sistema experimental implementado no introduce cambios significativos en el estado de polarización inicial de la luz, puesto que los factores de calibración obtenidos son aproximadamente el valor ideal $\eta\Delta 90 = 0.99 \pm 0.07$.

Tabla 5. Factor de calibración promedio para diferentes rangos de humedad relativa del aire

| Rango de HR del aire dentro de la cámara | Factor de calibración obtenido |
|--|--------------------------------|
| $30\% < HR < 70\%$ | 1.05 ± 0.06 |
| $70\% < HR < 90\%$ | 0.94 ± 0.08 |
| $HR > 90\%$ | 1.00 ± 0.07 |

4.4. Determinación de la razón lineal de despolarización volumétrica (δ_v) y de partículas (δ_p) para $HR < 60\%$

Obtenidos los factores de calibración $\eta\Delta 90$ para el sistema, se realizaron las mediciones de la señal de *backscattering* de los aerosoles introducidos en la cámara para la determinación de δ_v y δ_p del carbonato de calcio $CaCO_3$ para valores de $HR < 60\%$. Los resultados se presentan en las Figura 54 a,b,c,d y e



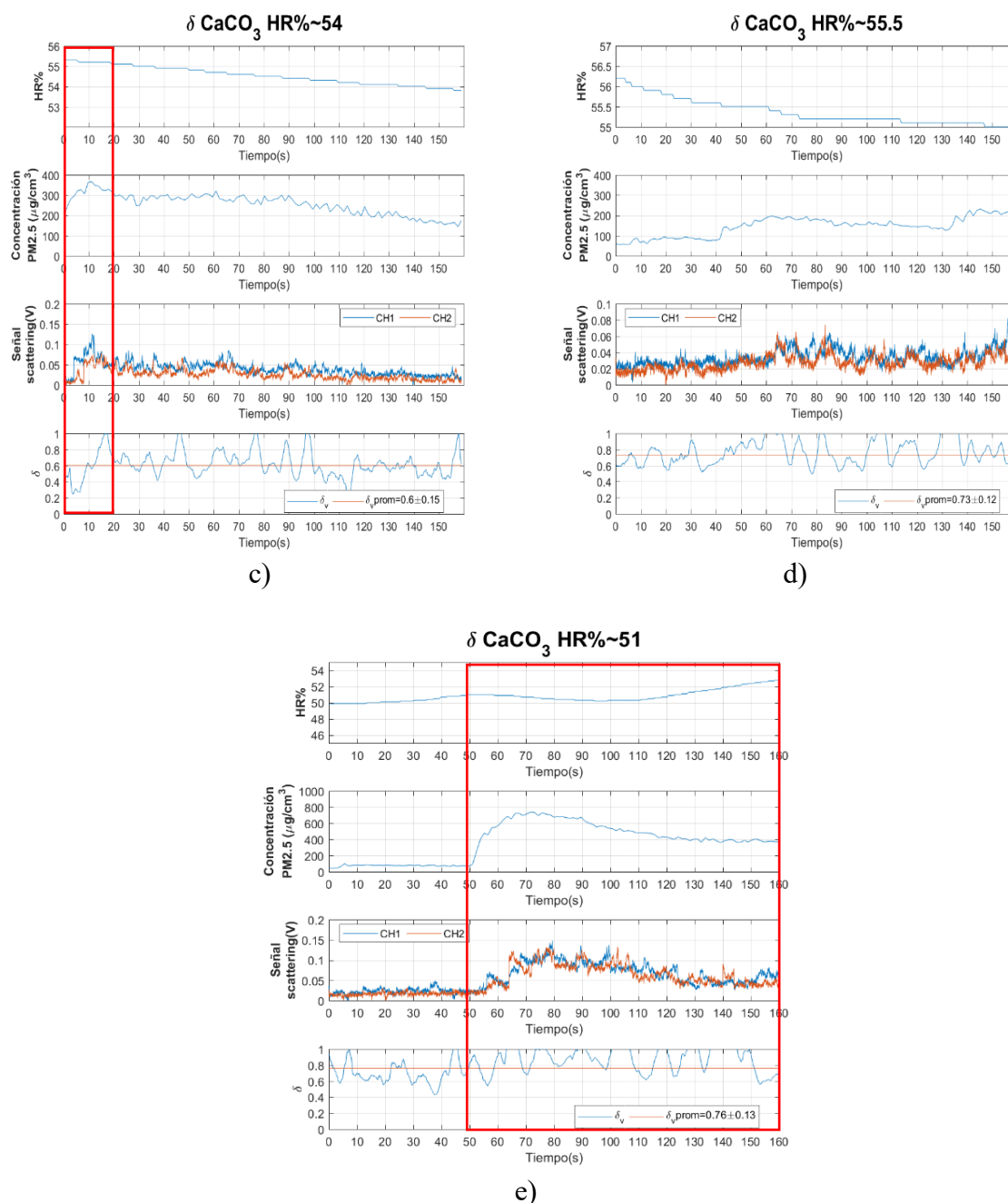


Figura 54. Gráficas de la evolución de la humedad relativa del aire (HR%), la concentración de partículas PM2.5 $\mu\text{g}/\text{cm}^3$, la señal de *backscattering* (V) y la razón lineal de despolarización volumétrica δ_v para aerosoles de carbonato de calcio CaCO_3 dentro de la cámara:

a) $\Delta\text{HR} = 9.0\%$ y $\Delta\text{PM}2.5 \text{ Conc.} = 220 \mu\text{g}/\text{cm}^3$; b) $\Delta\text{HR} = 16\%$ y $\Delta\text{PM}2.5 \text{ Conc.} = 520 \mu\text{g}/\text{cm}^3$; c) $\Delta\text{HR} = 1.4\%$ y $\Delta\text{PM}2.5 \text{ Conc.} = 200 \mu\text{g}/\text{cm}^3$; d) $\Delta\text{HR} = 1.4\%$ y $\Delta\text{PM}2.5 \text{ Conc.} = 140 \mu\text{g}/\text{cm}^3$ y e) $\Delta\text{HR} = 2.0\%$ y $\Delta\text{PM}2.5 \text{ Conc.} = 690 \mu\text{g}/\text{cm}^3$

En la Figura 54 se observa que las señales de retroesparcimiento tanto del canal CH1 correspondiente a la componente paralela del campo eléctrico, como las del canal CH2 correspondiente a la componente perpendicular, presentan intensidades similares, indicando una alta despolarización del estado lineal inicial de la luz. Los valores altos de despolarización pueden explicarse por la no esfericidad de las partículas, como es el caso de las partículas de CaCO_3 (Figura 55), pero también, pueden implicar una rotación de la polarización de la luz debido a la propiedad de birrefringencia de este compuesto químico [91].

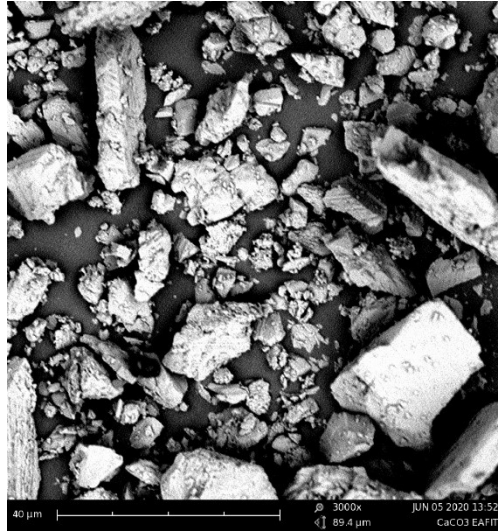


Figura 55. Fotografía SEM de las partículas de CaCO_3 .

Para todos los casos presentados en la Figura 54, se observa una correspondencia lineal entre el aumento de la concentración de partículas $\text{PM}_{2.5}$ y el aumento en la intensidad de *backscattering*, como se muestra en la Figura 56. Esta linealidad indica que la aproximación de esparcimiento por una sola partícula o *single scattering*, es válida para las condiciones del experimento.

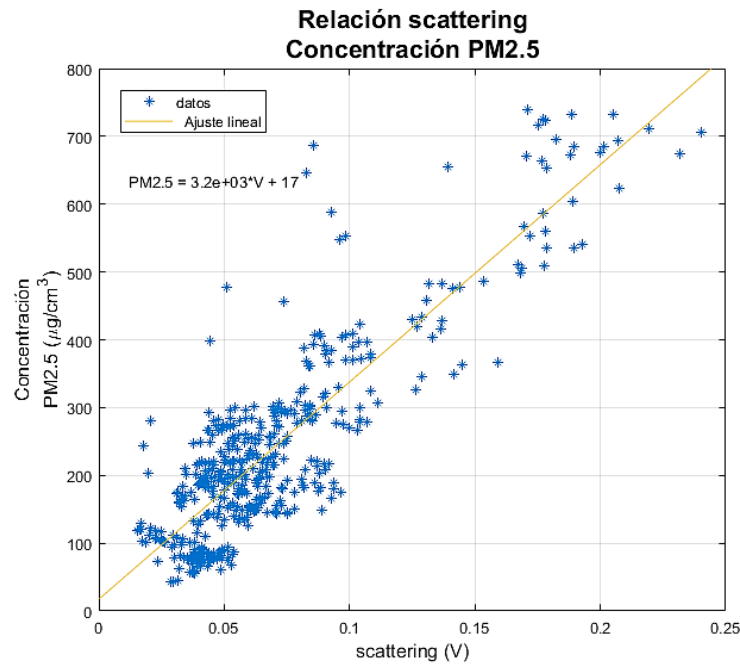
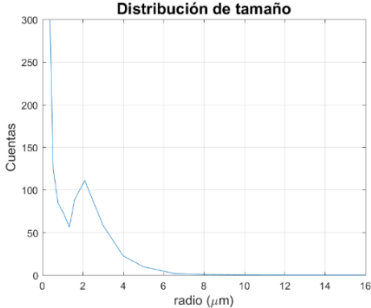
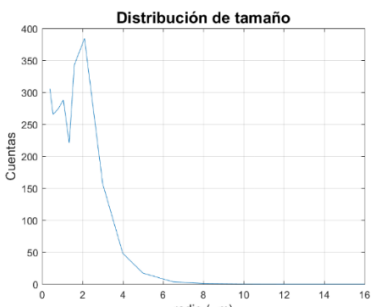
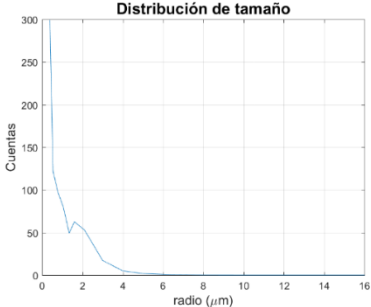
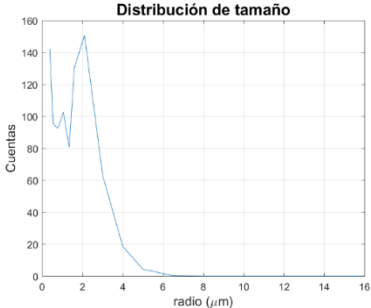


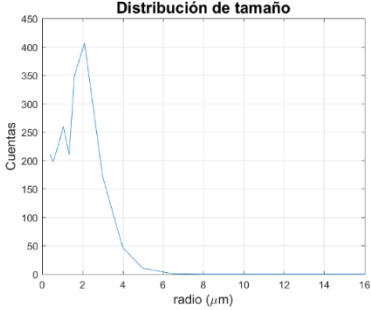
Figura 56. Dependencia lineal entre la concentración de partículas PM2.5 e Intensidad de luz retroesparcida por aerosoles de carbonato de calcio dentro de la cámara.

La despolarización para partículas no esféricas depende de sus ángulos de rotación respecto a la luz incidente, pero también del tamaño de las partículas, su composición química y de la humedad relativa del medio que las rodea como se ha descrito en el Capítulo 1 de este trabajo. En la Tabla 6 se relacionan los valores de humedad relativa del aire dentro de la cámara durante las medidas, la distribución de tamaño correspondiente y el valor de δ_v para el CaCO_3 con índices de refracción de referencia $n_1 = 1.66$ y $n_2 = 1.49$ [92]. A partir de los resultados consignados se observa que para una HR promedio del aire de $50\% \pm 10\%$ y una distribución de tamaño con radio modal promedio de $2.0 \mu\text{m}$, δ_v tiene un valor de 0.65 ± 0.17 .

Para entender el alto valor obtenido de δ_v para las partículas de CaCO_3 , es importante tener en cuenta que en el montaje experimental implementado las partículas pueden rotar debido al flujo de aire dentro de la cámara, por tanto, el valor final de δ_v es el promedio de los δ_v para las diferentes rotaciones de las partículas.

Tabla 6. Comparación entre distribución de tamaño de partículas, humedad relativa HR y δ_v para las mediciones de despolarización de la luz por partículas de $CaCO_3$.

| Número de Figura | Distribución de tamaño promedio | Humedad relativa HR% | δ_v (experimental) |
|-------------------|---|----------------------|---------------------------|
| <i>Figura 54a</i> |  | $HR < 40\%$ | 0.57 ± 0.20 |
| <i>Figura 54b</i> |  | $HR < 50\%$ | 0.59 ± 0.24 |
| <i>Figura 54c</i> |  | $HR \sim 54\%$ | 0.60 ± 0.15 |
| <i>Figura 54d</i> |  | $HR \sim 55.5\%$ | 0.73 ± 0.12 |

| | | | |
|-----------------------|---|-----------------|-----------------|
| <i>Figura 54e</i> |  | $HR \sim 51\%$ | 0.76 ± 0.13 |
| Promedio total | Distribución monomodal, $r_p = 2.0 \mu m$ | $50\% \pm 10\%$ | 0.65 ± 0.17 |

El valor de δ_p se obtuvo como se describió en el Capítulo 2, Sección 2.5 y en el Capítulo 3, Sección 3.2.2., el cálculo de LDR de partículas, que excluye la influencia de moléculas se define como muestra la Ecuación (67)

$$\delta_p = \frac{(1 + \delta_m)\delta_v R - (1 + \delta_v)\delta_m}{(1 + \delta_m)R - (1 + \delta_v)} \quad (67)$$

donde la razón de despolarización de moléculas se estableció como $\delta_m = 0.0034$ [93] y la razón de *backscatter* R se calculó utilizando la definición que se presenta en la Ecuación (68) [94].

$$R = \frac{\beta_a + \beta_m}{\beta_m} \quad (68)$$

donde $\beta_a = 7.2 \times 10^{-6}$ es el coeficiente de *backscatter* de aerosoles en $[\frac{1}{m sr}]$ para partículas de carbonato de calcio calculado por el software MOSMAP utilizando los parámetros de entrada establecidos en la Tabla 8 (capítulo resultados); y β_m es el coeficiente de *backscatter* de moléculas $\beta_m = 1.5 \times 10^{-6} [\frac{1}{m sr}]$, calculado para una atmósfera estándar utilizando el algoritmo de estandarización de LALINET [95], [96]. Por lo tanto $R = 5.8$ y la razón lineal de despolarización de partículas de carbonato de calcio es:

$$\delta_p = 0.8$$

4.5. Determinación de la razón lineal de despolarización volumétrica δ_v para $HR\% > 65\%$

Los resultados de las mediciones realizadas para la determinación de la LDR de aerosoles de carbonato de calcio inyectando aire húmedo dentro de la cámara para observar el comportamiento de estas partículas bajo condiciones de alta humedad se presentan en las Figura 57 a, b,c y d

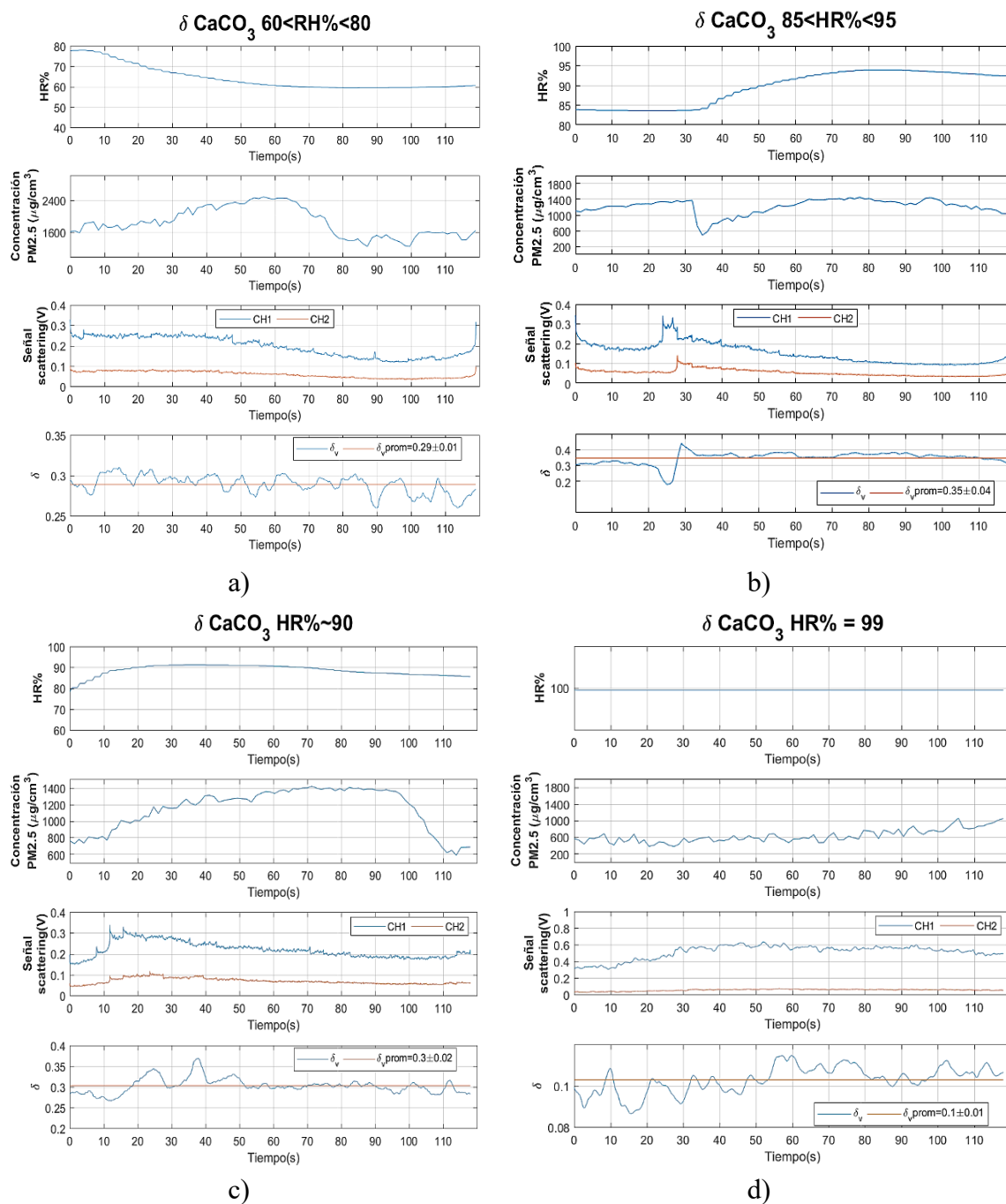


Figura 57. Gráficas comparativas entre humedad relativa del aire (HR%), concentración de partículas $PM_{2.5} \mu g/cm^3$, señal de *backscattering* (V) y razón lineal de despolarización volumétrica δ_v para aerosoles de carbonato de calcio $CaCO_3$ bajo condiciones de humedad relativa mayor a 60%.

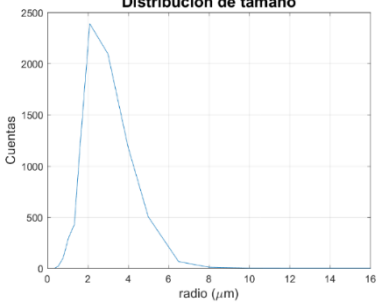
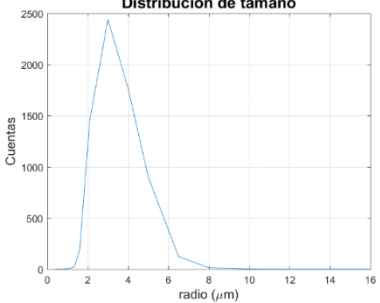
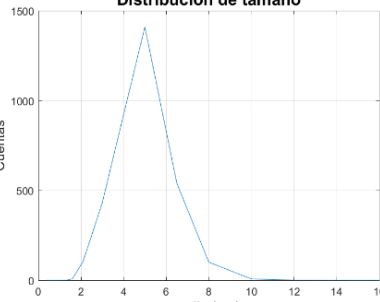
a) $\overline{HR} = 70\%$ y $\overline{PM_{2.5} Conc.} = 2000 \mu g/cm^3$; b) $\overline{HR} = 90\%$ y $\overline{PM_{2.5} Conc.} = 1000 \mu g/cm^3$;
 c) $\overline{HR} = 85\%$ y $\overline{PM_{2.5} Conc.} = 1100 \mu g/cm^3$; d) $\overline{HR} = 99\%$ y $\overline{PM_{2.5} Conc.} = 800 \mu g/cm^3$

Para todas las mediciones realizadas en estas condiciones de alta humedad relativa del aire dentro de la cámara se observa un aumento significativo tanto en la concentración de partículas como en la intensidad de *backscattering* respecto a los resultados mostrados en la sección anterior, pese a que el flujo de inyección de aerosoles se mantuvo invariante (12 l/min). Esto implica que a pesar de que el $CaCO_3$ tiene un parámetro de higroscopicidad teórico muy bajo ($\kappa = 0.002$) [97] los aerosoles aumentaron su tamaño, presumiblemente como gota activada, por el efecto de adsorción [98]. Esta hipótesis se confirma observando las medidas de distribución de tamaño presentadas en la Tabla 7, para las cuales el valor del radio modal de la distribución de tamaño aumenta con el incremento de la humedad relativa del aire.

Adicionalmente, en la Figura 58 se resume la relación experimental encontrada entre la razón de despolarización lineal volumétrica y la humedad relativa del aire que rodea las partículas de $CaCO_3$ dentro de la cámara. Se observa que a medida que la HR del aire aumenta, δ_v disminuye, confirmando la tendencia de las partículas a cambiar su forma de asimétrica a esférica a medida que adsorbe vapor de agua. Sin embargo, δ_v no disminuye hasta un valor nulo (0.0), lo que sugiere que a pesar de que la partícula haya adquirido una forma aproximadamente esférica, siendo el $CaCO_3$ un mineral insoluble, la forma final no es isotrópica sino un aerosol internamente mezclado, es decir, resulta un aerosol de composición heterogénea [99].

Tabla 7. Comparación entre distribución de tamaño de partículas, humedad relativa y δ_v .

| Número de Figura | Distribución de tamaño promedio | Humedad relativa % | δ_v (experimental) |
|------------------|---------------------------------|--------------------|---------------------------|
|------------------|---------------------------------|--------------------|---------------------------|

| | | | |
|-----------------------|--|---|---|
| <p>Figura 57a</p> | <p style="text-align: center;">Distribución de tamaño</p>  <p style="text-align: center;">$r_p = 2.6 \mu m$</p> | <p style="text-align: center;">$60\% < HR$ $< 80\%$</p> | <p style="text-align: center;">0.29 ± 0.01</p> |
| <p>Figura 57b</p> | <p style="text-align: center;">Distribución de tamaño</p>  <p style="text-align: center;">$r_p = 3.0 \mu m$</p> | <p style="text-align: center;">90%</p> | <p style="text-align: center;">0.35 ± 0.04</p> |
| <p>Figura 57c</p> | <p style="text-align: center;">Distribución de tamaño</p>  <p style="text-align: center;">$r_p = 5.0 \mu m$</p> | <p style="text-align: center;">99%</p> | <p style="text-align: center;">0.1 ± 0.01</p> |

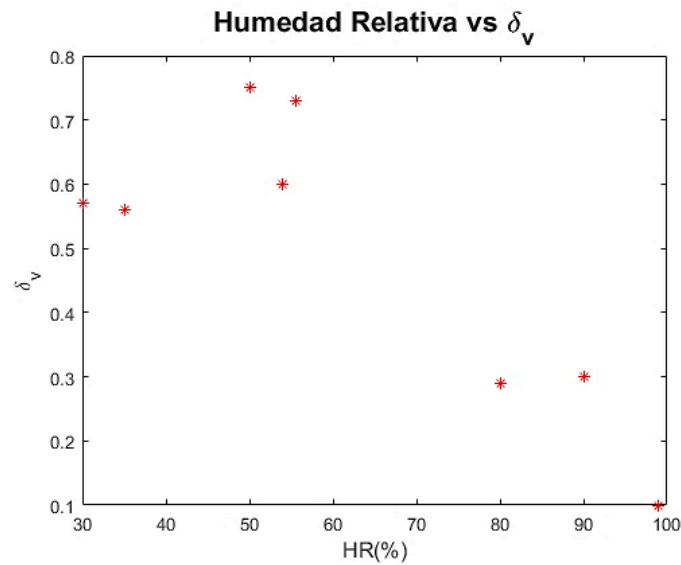


Figura 58. Relación experimental entre la HR del aire y δ_v para aerosoles de $CaCO_3$

4.6. Simulación de scattering de partículas

Finalmente, se realizaron cálculos teóricos del *bakscattering* de aerosoles de $CaCO_3$ usando MOPSMAP. Los parámetros de entrada utilizados se muestran en la Tabla 8. Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 9. Como se ha descrito antes, el carbonato de calcio es un compuesto birrefringente, sin embargo, MOPSMAP supone un índice de refracción constante. Por lo tanto, aunque la birrefringencia produce rotaciones del estado inicial de polarización que pueden ser detectadas por los fotosensores, no es tenido en cuenta en la simulación, de allí la diferencia porcentual del 22% entre el resultado teórico y el experimental de δ_v . A partir de los valores de la matriz F se concluye que el carbonato de calcio introduce componentes circular y elíptica en la polarización a $\pm 45^\circ$, puesto que todos los elementos de la diagonal de la matriz son diferentes de cero. Es importante rescatar que la simulación indica que en este compuesto químico la absorción de luz es nula y la extinción es debida completamente al *scattering* ($SSA = 1.0$) así como también, que efectivamente el $ASY = 0.64$ indica predominancia del *scattering* hacia adelante.

Tabla 8. Parámetros de *entrada* para la simulación de *bakscattering* de aerosoles de $CaCO_3$ en MOPSMAP.

| Parámetro de entrada | Valor |
|--------------------------------|----------------|
| Concentración ($\mu g/cm^3$) | 500 |
| Distribución de tamaño | Log normal |
| Radio modal (μm) | $r_{mod} = 2$ |
| Ancho de la distribución | $\sigma = 1.5$ |

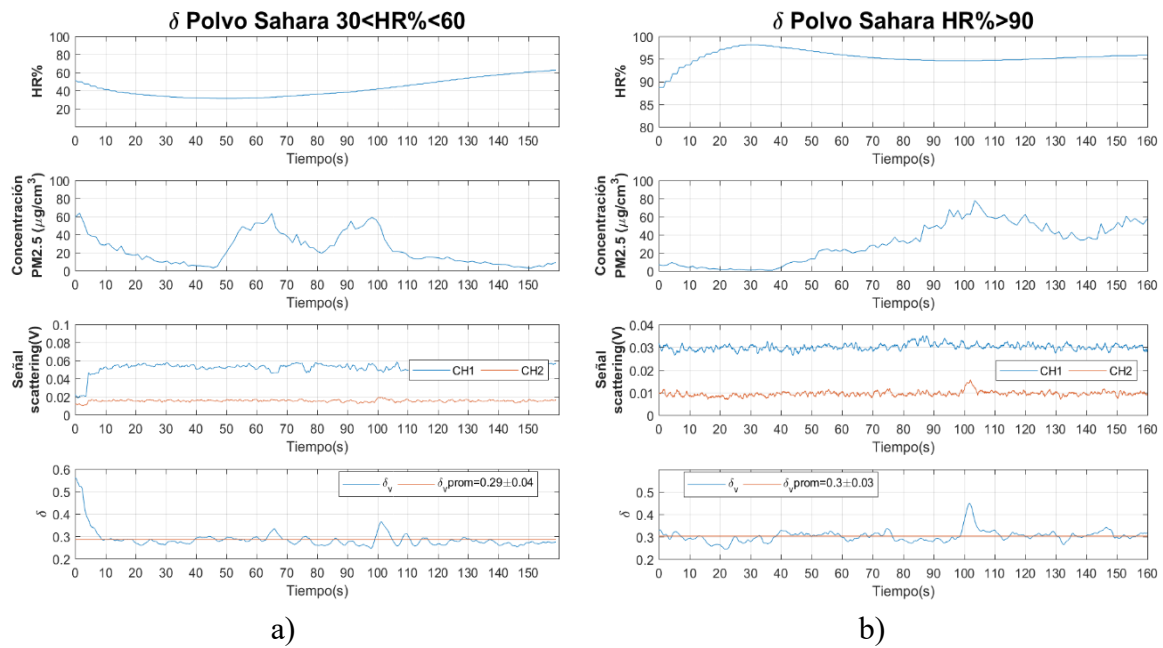
| | |
|------------------------------|-------------------|
| Radio mínimo (μm) | $r_{min} = 0.005$ |
| Radio máximo (μm) | $r_{max} = 2.5$ |
| Densidad (g/cm^3) | 2.7 |
| Parámetro de higroscopicidad | $\kappa = 0.002$ |
| Índice de refracción | $n = 1.49 + 0i$ |
| Forma de las partículas | Forma irregular E |
| nHumedad relativa (%) | $HR = 0\%$ |
| Longitud de onda (nm) | $\lambda = 532$ |

Tabla 9. Parámetros de *salida* para la simulación de *bakscattering* de aerosoles de $CaCO_3$ en MOPSMAP.

| Parámetro de salida | Valor |
|--|--|
| Matriz de fase | $F(180^\circ) = \begin{bmatrix} 1.1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.336 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -0.336 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.428 \end{bmatrix}$ |
| Razón lineal de despolarización volumétrica δ_v | 5.321×10^{-1} |
| Coefficiente de extinción ($1/m$) | 5.693×10^{-5} |
| Albedo de scattering simple (SSA) | 1.0 |
| Parámetro de asimetría (ASY) | 6.389×10^{-1} |
| Coefficiente de <i>backscatter</i> ($\frac{1}{m \cdot sr}$) | 4.985×10^{-6} |
| Razón Lidar (sr) | 11.4 |

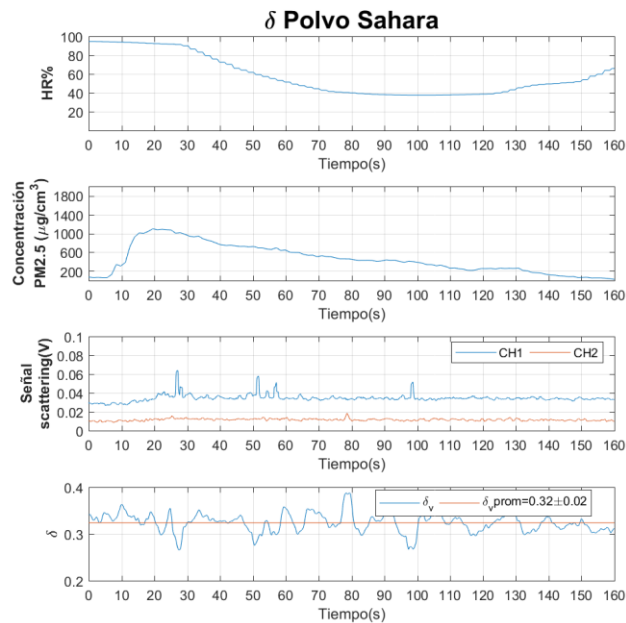
4.6. Determinación de la razón lineal de despolarización volumétrica δ_v para polvo del Sahara en condiciones de laboratorio.

Se realizaron mediciones para determinar la razón de despolarización lineal volumétrica a partir de polvo mineral del desierto del Sahara bajo diferentes condiciones de HR del aire dentro de la cámara. Los resultados se muestran en la Figura 59 a, b y c. En cada una de estas Figuras se muestran las gráficas para analizar de forma simultánea el comportamiento del sistema para las variables de interés: humedad relativa del aire HR, concentración de partículas de PM2.5, intensidad de *backscattering* en los canales CH1 y CH2 de los fotomultiplicadores y razón lineal de despolarización volumétrica δ_v . En la *Tabla 10* se muestra en resumen los valores de humedad relativa del aire dentro de la cámara durante las medidas, la distribución de tamaño correspondiente y el valor de δ_v para el polvo del Sahara utilizado.



a)

b)

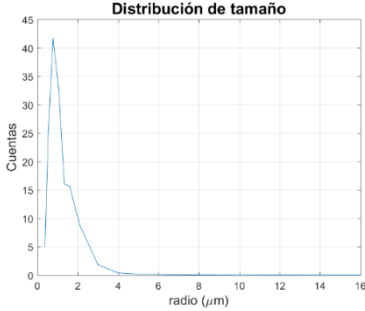
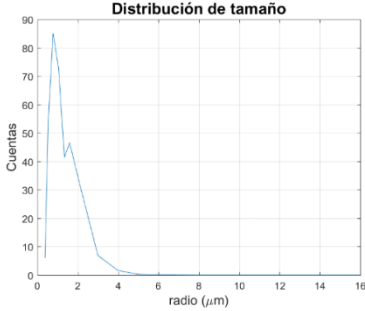
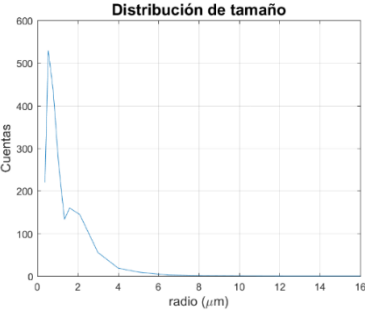


c)

Figura 59. Gráficas comparativas entre humedad relativa del aire (HR%), concentración de partículas $\text{PM}_{2.5} \mu\text{g}/\text{cm}^3$, señal de *backscattering* (V) y razón lineal de despolarización volumétrica para aerosoles de polvo del Sahara bajo condiciones de baja y alta HR.

a) $\overline{\text{HR}} = 50 \%$ y $\overline{\text{PM}_{2.5} \text{ Conc.}} = 30 \mu\text{g}/\text{cm}^3$; b) $\overline{\text{HR}} = 95 \%$ y $\overline{\text{PM}_{2.5} \text{ Conc.}} = 40 \mu\text{g}/\text{cm}^3$; c) $\overline{\text{HR}} = 70 \%$ y $\overline{\text{PM}_{2.5} \text{ Conc.}} = 500 \mu\text{g}/\text{cm}^3$;

Tabla 10. Resultados de los experimentos con polvo del Sahara en el sistema de medida implementado en este trabajo.

| Número de Figura | Distribución de tamaño promedio | Humedad relativa % | δ_v (experimental) |
|------------------------|---|-------------------------|---------------------------|
| Figura 59 ^a |  <p style="text-align: center;">$r_p = 0.9 \mu m$</p> | $30\% < HR$ $< 60\%$ | 0.29 ± 0.04 |
| Figura 59 ^b |  <p style="text-align: center;">$r_p = 0.4 \mu m$</p> | $HR < 90\%$ | 0.30 ± 0.03 |
| Figura 59 ^c |  <p style="text-align: center;">$r_p = 0.5 \mu m$</p> | $20\% < HR$ $< 99\%$ | 0.32 ± 0.02 |

A partir de los resultados consignados en la Figura 12 y en la Tabla 7 se observa que el nivel de concentración de PM_{2.5} de polvo del Sahara alcanzado dentro de la cámara no se encuentra dentro del rango de fiabilidad del sistema para la medición del *backscattering* (mínimo $200 \mu g/cm^3$), adicionalmente, la distribución de tamaño de las partículas indica

que el generador de aerosoles estaba operando en el límite inferior de su rango de diseño (0.5 a 3.0 μm , Capítulo 3, sección 3.1.2). Sin embargo, con las partículas disponibles dentro de la cámara, se obtuvo un valor δ_v promedio de 0.30 para todos los rangos de HR del aire, es decir, los aerosoles de polvo desértico del Sahara en el rango de tamaños disponible no cambian significativamente su forma y tamaño debido a la humedad del aire que los rodea, es decir, no son higroscópicos.

En la Tabla 11 y Tabla 12 se presentan los parámetros utilizados para la simulación en MOPSMAP del scattering de aerosoles desérticos y los resultados obtenidos, respectivamente.

Tabla 11. Parámetros de entrada para la simulación de *scattering* de aerosoles provenientes del desierto del Sahara.

| Parámetro de entrada | Valor |
|---|--|
| Concentración ($\mu\text{g}/\text{cm}^3$) | 100 |
| Distribución de tamaño | Log normal |
| Radio modal (μm) | $r_{mod} = 1$ |
| Ancho de la distribución | $\sigma = 1.5$ |
| Radio mínimo (μm) | $r_{min} = 0.05$ |
| Radio máximo (μm) | $r_{max} = 5$ |
| Densidad (g/cm^3) | 2.6 |
| Parámetro de higroscopicidad | $\kappa = 0$ |
| Índice de refracción | $n = 1.55 + 0i$ |
| Forma de las partículas | Distribución Kandler [100] (distribución de forma de partículas determinadas para polvo Sahariano) |
| Humedad relativa (%) | $HR = 0\%$ |
| Longitud de onda (nm) | $\lambda = 532$ |

Tabla 12. Resultados de la simulación de scattering con MOPSMAP para partículas de polvo del desierto del Sahara.

| Parámetro de salida | Valor |
|---|-------------------------|
| Razón lineal de despolarización volumétrica δ_v | 0.295 |
| Coefficiente de <i>backscatter</i> ($\frac{1}{\text{m} \cdot \text{sr}}$) | 1.7169×10^{-6} |
| Razón lidar (sr) | 40.64 |
| Coefficiente de extinción (1/m) | 6.9779×10^{-5} |

Los resultados de la simulación muestran que δ_v experimental (0.29) coincide con δ_v teórico (0.295) con un bajo error relativo de 1.6%, y a partir del coeficiente de backscatter se obtiene un $\delta_p = 0.31$. Estudios realizados con sistemas Lidar de despolarización a 532 nm para la determinación de δ_v y δ_p de aerosoles desérticos presentan valores de δ_v en el rango comprendido entre 0.14 y 0.18 para partículas finas y con un valor máximo de 0.30 como resultado del efecto neto de partículas finas y gruesas [101] [102] [103].

Para δ_p se reportan valores experimentales entre 0.27 y 0.40 [104] [105] y valores simulados entre 0.35 y 0.40 para partículas de polvo con diámetros de 1.5 a 2.0 μm [101] [106]. Por lo tanto, tomando como referencia estos valores se observa que el sistema para la medida de la razón lineal de despolarización de partículas desarrollado se encuentra dentro del rango de los valores en la literatura.

CONCLUSIONES

La revisión del estado del arte en el área de estudio y medición de la despolarización de la luz debido a los aerosoles permite anotar que el desarrollo de este trabajo tiene varios factores diferenciales respecto a los trabajos encontrados en la literatura, por ejemplo, la mayoría de trabajos enfocados a la caracterización óptica de aerosoles utilizan mediciones directas a la atmósfera, las cuales conllevan incertidumbres asociadas a la imposibilidad de controlar variables meteorológicas y la dificultad de discriminar entre los diferentes aerosoles presentes en la medida.

Adicionalmente, después de una revisión de los antecedentes, fueron encontradas solo dos publicaciones sobre la caracterización óptica de aerosoles en condiciones controladas de laboratorio, en la primera^a se simula experimentalmente el comportamiento óptico de nubes y aerosoles controlando variables meteorológicas para una cámara de 84 m^3 , en la segunda^b se trabaja con una cámara de 0.1 m^3 pero que no cuenta con control de variables meteorológicas. Por lo tanto, se destaca que el desarrollo de esta herramienta cámara de 0.015 m^3 a nivel local para la caracterización óptica de aerosoles en condiciones de laboratorio, presenta un potencial importante para el desarrollo de estudios científicos y técnicos de los aerosoles locales, y se constituye en un aporte específico para la comprensión del problema de calidad de aire de la región.

La herramienta de laboratorio desarrollada durante esta investigación permite medir la razón lineal de despolarización de aerosoles bajo diferentes condiciones de humedad relativa. Esta herramienta está constituida por una cámara cerrada, un fluidizador de aerosoles, un sistema óptico para el envío y recolección de la luz retroesparcida por las partículas, de dividir y medir las intensidades de las componentes ortogonales del campo óptico producido después de la interacción luz-aerosol. Adicionalmente, el sistema desarrollado dispone de sensores y actuadores para el control y medición continua de la humedad relativa y la temperatura del aire, permitiendo estudiar los efectos de este tipo de variables meteorológicas sobre las propiedades ópticas de las partículas de interés.

En particular, el sistema de control de la humedad relativa utiliza un control en lazo cerrado ON-OFF, que permite alcanzar valores de humedad relativa al interior de la cámara entre 60% y 99% con un error del 10%. El sistema de control de la temperatura del aire usa un PID para cubrir un rango de temperaturas entre 13°C y 50°C con un error del 8%. Este sistema es de gran utilidad para el estudio de la respuesta óptica de los aerosoles en condiciones de media y alta humedad, y para el estudio futuro de la formación de nubes a partir de diversos aerosoles¹.

El fluidizador desarrollado y caracterizado permite seleccionar partículas en seco de radio inferior a $3.0 \mu\text{m}$ para un caudal de aire de 12 l/min . Para el caso del carbonato de calcio, el fluidizador produjo una distribución de tamaños monomodal centrada en $2.0 \mu\text{m}$ y una concentración promedio de $400 \mu\text{g/cm}^3$ para $HR < 60\%$. Para el polvo del Sahara, se obtuvo una concentración promedio de $200 \mu\text{g/cm}^3$ y una distribución de tamaño s monomodal con centro en $1.0 \mu\text{m}$.

El sistema óptico diseñado e implementado consta de elementos ópticos para la emisión y envío de un haz continuo de luz láser al interior de la cámara, y para la recolección de la luz retroesparcida por los aerosoles al interior de la cámara. El análisis de aberraciones de polarización en los elementos ópticos y la calibración permite concluir que los efectos de estos elementos sobre las medidas de despolarización son despreciables, siendo la variación máxima del orden de 10^{-4} al mantener entre los elementos ópticos una alineación que no superen los 10° de inclinación.

Finalmente, se comprobó el funcionamiento de la herramienta midiendo la razón lineal de despolarización δ_v del carbonato de calcio y de polvo del Sahara y observando los efectos de la humedad relativa sobre las propiedades físicas y ópticas de estos aerosoles. Para ello, se determinó en primero lugar el ruido electrónico y el ruido de fondo en el sistema, se encontró

-
- a. ¹ E. Järvinen et al., 2016. *Laboratory investigations of mineral dust near-backscattering depolarization ratios.*
 - b. Sakai, T. et al., 2010., *Backscattering linear depolarization ratio measurements of mineral, sea-salt, and ammonium sulfate particles simulated in a laboratory chamber.*

que las frecuencias de este ruido están en el rango entre $1.42 \times 10^4 \text{ Hz}$ y $5.0 \times 10^5 \text{ Hz}$. Además, se determinó la correspondencia lineal entre la concentración de aerosoles y la señal de *backscattering* en voltios para este sistema en el rango de $200 \mu\text{g}/\text{cm}^3$ hasta los $13000 \mu\text{g}/\text{m}^3$, rango de concentración de partículas que se constituye entonces en el rango de trabajo confiable del sistema desarrollado.

El valor medio obtenido para el carbonato de calcio de δ_v es 0.65 ± 0.17 para una $HR = 50\% \pm 10\%$ y una distribución de tamaño log normal con radio modal $r_{mod} = 2.0 \mu\text{m}$. De las mediciones para diferentes valores de la humedad relativa se encontró que δ_v decae hasta 0.10, indicando un cambio de forma irregular a una forma aproximadamente esférica a partir de $HR > 70\%$, a partir de este valor de la humedad relativa del aire también se presentó un cambio en el tamaño de la partícula pasando de una distribución normal con centro en $2.0 \mu\text{m}$ a una distribución de tamaños con centro en $5.0 \mu\text{m}$. Dado que el CaCO_3 es un mineral insoluble, se presume que la forma final no es isotrópica sino la de un aerosol de composición heterogénea debido a la adsorción del vapor de agua disponible. Dado que la determinación δ_p requirió de cálculos teóricos y de simulación con MOSMAP, se concluye que es preciso continuar con el estudio de la despolarización de la luz de este compuesto químico en relación con la concentración de partículas, la distribución de tamaños y la humedad relativa del aire.

En el caso del polvo del Sahara, se generaron partículas cuyo radio modal promedio fue de $1.0 \mu\text{m}$, obteniendo $\delta_v = 0.30 \pm 0.03$ para todos los rangos de humedad relativa del aire utilizados en las medidas ($20\% < HR < 99\%$), esto implica que, estos aerosoles no cambian significativamente el valor de despolarización en función de la humedad del aire circundante. El resultado de la simulación con MOSMAP para estas partículas de polvo de la razón lineal de despolarización fue $\delta_v = 0.295$, por lo tanto, se concluye que δ_v experimental coincide con δ_v teórico con un error del de 1,6%. En cuanto al resultado semiempírico de $\delta_p = 0.31$ se concluye que se encuentra dentro del rango registrado en la literatura.

TRABAJOS FUTUROS Y RECOMENDACIONES

De forma concreta y entendiendo el potencial de la herramienta de medida desarrollada en este trabajo, se recomienda para los trabajos futuros tener en cuenta las siguientes consideraciones.

- Inyectar otro tipo de aerosoles a la cámara, especialmente del grupo ya identificado que componen la atmósfera del Valle de Aburrá y obtener sus propiedades ópticas bajo

diferentes condiciones de humedad relativa y temperatura del aire para obtener un inventario que sirva como referencia para mediciones Lidar.

- Adaptar los códigos de procesamiento de las señales a una mejor interfaz de usuario de modo que el dispositivo pueda ser usado cualquier usuario.
- Facilitar las condiciones de limpieza dentro de la cámara y en los conductos de circulación de aerosoles para hacer más rápida y práctica la utilización del dispositivo.
- Mejorar la automatización para el control de las variables de humedad relativa y temperatura dentro de la cámara. Pasando de error del 10% al 2%.
- Mejorar el método teórico-experimental de determinación de delta de partículas.

Bibliografía

- [1] NASA earth observatory, «Aerosols and Incoming Sunlight (Direct Effects),» 2 noviembre 2010. [En línea]. Available: <https://earthobservatory.nasa.gov/features/Aerosols/page3.php>. [Último acceso: marzo 2019].
- [2] NASA earth observatory, «Aerosols and Clouds (Indirect Effects),» 2 noviembre 2010. [En línea]. Available: <https://earthobservatory.nasa.gov/features/Aerosols/page4.php>. [Último acceso: marzo 2019].
- [3] M. Mehta, « Analysis of Color and Particulate Depolarization Ratio Profiles for Aerosols using CALIPSO,» *Journal of Remote Sensing & GIS*, 2015.
- [4] J. Gasteiger, S. Groß, V. Freudenthaler, M. Haarig y C. Toledano, «Characterization of Saharan dust at different distances from the source,» *Geophysical Research Abstracts*, 2015.
- [5] M. Haarig, D. Althausen, A. Ansmann, A. Klepel, H. Baars, R. Engelmann, S. Groß y V. Freudenthaler, « Measurement of the linear depolarization ratio of aged dust at three wavelengths (355, 532 and 1064 nm) Simultaneously over Barbados,» *The European Physical Journal Conferences*, 2016.
- [6] H. T. T. F. E. J. R. S. E. S. & T. S. B. D. M. Murphy, «A miniature scanning sun photometer for vertical profiles and mobile platforms,» *Aerosol Science and Technology*, 2015.
- [7] C. E. Chung, «Aerosol Direct Radiative Forcing: A Review,» *intech*, 2012.

- [8] Z. Liu, D. Liu, J. Huang, M. Vaughan, I. Uno y N. Sugimoto, «Airborne dust distributions over the Tibetan Plateau and surrounding areas derived from the first year of CALIPSO lidar observations,» *Atmospheric, Chemistry and Physics*, p. 5046, 2008.
- [9] M. Hayman y J. P. Thayer, «General description of polarization in lidar using Stokes vectors and polar decomposition of Mueller matrices,» *J. Opt. Soc. Am*, vol. 29, 2012.
- [10] Z. Liu, A. Omar, M. Vaughan, J. Hair, C. Kittaka, Y. Hu, K. Powell, C. Trepte, D. Winker, C. Hostetler, R. Ferrare y R. Pierce, «CALIPSO lidar observations of the optical properties of Saharan dust: A case study of long-range transport,» *JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH*, vol. 113, 2008.
- [11] M. Haaring y A. Ansmann, «Measurement of the Linear Depolarization Ratio of Aged Dust at Three Wavelengths (355, 532 and 1064 nm) Simultaneously over Barbados,» *EPJ Web of Conferences*, vol. 119, p. 18009, 2016.
- [12] D. Althausen, M. D. A. A, U. Wandinger, H. Hube, E. Clauer y S. Zörner, «Scanning 6-wavelength 11-channel aerosol Lidar,» *J. Atmos. Oceanic Technol*, vol. 17, pp. 1469-1482, 2000.
- [13] B. Heese y M. Wigner, «Vertical aerosol profiles from Raman polarization lidar observations during the dry season AMMA field campaign,» *J. Geophys. Res*, 2008.
- [14] F. Volker, «About the effects of polarising optics on lidar signals and the $\Delta 90$ calibration,» *Atmospheric Measurement Techniques*, 2016.
- [15] .. Snels, F. Cairo, F. Colao y D. Donfrancesco, «Calibration method for depolarization lidar measurements,» *International Journal of Remote Sensing*, pp. 5725-5736, 2009.
- [16] B. Liu y Z. Wang, «Improved calibration method for depolarization,» *Optics Express*, vol. Vol. 21, nº No. 12, 2013.
- [17] T. Sakai, T. Nagai, Y. Zaizen y a. Y. Mano, «Backscattering linear depolarization ratio measurements of mineral, sea-salt, and ammonium sulfate particles simulated in a laboratory chamber,» *APPLIED OPTICS*, pp. 4441-4449, 2010.
- [18] E. J. a, O. Kempinen, T. Nousiainen, T. Kociok y O. Möhler, «Laboratory investigations of mineral dust near-backscattering depolarization ratios,» *Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer*, 2016.
- [19] M. Haarig, A. Ansmann, J. Gasteiger, K. Kandler, D. Althausen, H. Baars, M. Radenz y D. A. Farrell, «Dry versus wet marine particle optical properties: RH dependence of depolarization ratio, backscatter and extinction from multiwavelength lidar measurements during SALTRACE,» *Atmospheric Chemistry and Physics*, p. 14199–14217, 2017.
- [20] M. Mishchenko, L. Travis y A. Lacis, «Scattering, Absorption, and Emission of Light by small particles,» de *Scattering, Absorption, and Emission of Electromagnetic radiation by an arbitrary finite particle*, Cambridge, 2002, pp. 32-63.
- [21] M. Michael y T. Larry, «T-Matrix computation of light scattering by nonspherical particles,» *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer*, vol. 55, nº 5, pp. 535-575, 1996.

- [22] J. Leinonen, «High-level interface to T-matrix scattering calculations: architecture, capabilities and limitations,» *Optical Express*, vol. 22, pp. 1655-1660, 2014.
- [23] M. A. Yurkin y A. G. Hoekstra, «The discrete-dipole-approximation code ADDA: Capabilities and know limitations,» *Journal of Quantitative Spectroscopy & Raditative Transfer*, p. 2234–2247, 2011.
- [24] P. Yang, Q. Feng y G. Hong, «Modeling of the scattering and radiative properties of nonspherical dust-like aerosols,» *Journal of Aerosol Science*, vol. 38, pp. 995-1014, 2007.
- [25] J. Gasteiger y M. Wiegner, «MOPSMAP v1.0: a versatile tool for the modeling of aerosol optical properties,» *Geosci. Model Dev*, pp. 2739-2762, 2018.
- [26] M. Salby, *Physics of the Atmosphere and Climate*, Cambridge University, 2012.
- [27] D. G. Andrews, *An Introduction to Atmospheric Physics*, Cambridge University Press, 2010.
- [28] *Standard Atmosphere: ISO 2533:1975*, 1975.
- [29] McGraw-Hill, "Troposphere". *Concise Encyclopedia of Science & Technology*, 1984.
- [30] R. J. Sica, «Purple Crow LIDAR,» Department of Physics and Astronomy - University of Western Ontario, 1999. [En línea]. Available: <http://pcl.physics.uwo.ca/science/temperature/>. [Último acceso: 11 11 2019].
- [31] U.S. Climate Change Science Program, «Atmospheric Aerosol Properties and Climate Impacts,» 2009.
- [32] G. Visconti, «Aerosols and Clouds,» de *Fundamentals of Physics and Chemistry of the Atmosphere*, 2016, pp. 261-293.
- [33] Dartmouth College Electron Microscope Facility, «Enlarge image about 500 times of pollen produced by different varieties of plants,» 2004. [En línea]. Available: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Misc_pollen.jpg. [Último acceso: 3 12 2019].
- [34] C. G. Goldin, «The scanning electron microscope in microbiology and diagnosis of infectious disease,» *Scientific report*, 2016.
- [35] A. LAskin, «reaction at interfaces as a source of sulfate formation in sea-salt particles,» *research articles*, 2003.
- [36] R. Husar, «Intercontinental Transport of Dust: Historical and Recent Observational Evidence,» *The Handbook of Environmental Chemistry Vol. 4*, 2015.
- [37] K. Klouda, S. Brádka y P. Otáhal, *Experiences with Anthropogenic Aerosol Spread in the Environment*, 2012.
- [38] P. Kulkarni, P. Baron, C. M. Sorensen y M. Harper, «Nonspherical Particle Measurement: Shape Factor, Fractals and Fibers».
- [39] S. Ramachandran, «Atmospheric Aerosols Boca Raton,» *CRC Press*.
- [40] Van-de-Hulst, «light scattering by small particles,» Dover publications, New York, 1981.
- [41] J. Dutton, «meteo 300: Fundamentals of Atmospheric Science,» [En línea]. Available: <https://www.e-education.psu.edu/meteo300/node/785>. [Último acceso: 23 12 2019].
- [42] K. Liou, «an introduction to atmospheric radiation,» *Elsevier Science*, vol. 84, 2002.

- [43] C. Bohren y D. Huffman, «Absorption and scattering of Light by Small Particles,» *A Wiley Interscience Publication, John Wiley & Sons, Inc*, 1983.
- [44] D. Deirmendjian, «Scattering on Spherical Polydispersions,» *Elsevier New York*, 1969.
- [45] E. S. Zubko, «Light scattering by irregularly shaped particles with sizes comparable to the wavelength,» *springer link*, 2012.
- [46] J. Seinfeld y P. S.N, «Atmospheric chemistry and physics:from air pollution to climate change,» *John Wiley & Sons*, 2012.
- [47] P. Zieger, R. Fierz-Schmidhauser, E. Weingartner y U. Baltensperger, «Effects of relative humidity on aerosol light scattering results from different European sites,» *atmo. Che. Phys*, pp. 10609-10631, 2013.
- [48] H. Köhler, «The nucleus in and the growth of hygroscopic droplets,» *Transactions of the Faraday Society*, vol. 32, pp. 1152-1161, 1936.
- [49] M. Petters y S. Kreidenweis, «A Single parameter representation of hygroscopic growth and cloud condensation nucleus activity,» *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2007.
- [50] Y. Zhang y S. M. S., «Changing shapes and implied viscosities of suspended submicron particles,» *Atmos. Chem. Phys*, 2015.
- [51] D. Singh, *Fundamentals of Optics*, PHI Learning , 2015.
- [52] H. Eugene, «Polarization,» de *Optics*, 2017.
- [53] C. Cano-Barrera, «Diseño e implementación de un microscopio de luz polarizada para la medición cuantitativa de propiedades polarimétricas en muestras biológicas,» EAFIT, Medellín, 2017.
- [54] Van-der-Hulst, «Secc. 5.2, 5.12,» de *light scattering by small particles*, 1957.
- [55] E. Garcia-Caurel, R. Ossikovski, M. Foldyna, A. Pierangelo y A. De Martino, «Advanced Mueller Ellipsometry Instrumentation and Data,» *Spinger*, 2013.
- [56] E. Collett, «Field Guide to Polarization,» *SPIE*, 2005.
- [57] Z. Liu y J. F. Barlow, «A Review of Progress and Applications of Pulsed Doppler Wind Lidars,» *remote sensing*, 2019.
- [58] M. Liang y B. Mikkell, «Continuous-wave differential absorption lidar,» *Laser and photonics review*, 2015.
- [59] A. V. Malinka, «Raman lidar remote sensing of geophysical media,» de *light scattering reviews*, *springer link*, 2007.
- [60] R. Schotland, S. K y S. R., «Observation by Lidar of Linear Depolarization Ratios for Hydrometeors,» *J. Appl. Meteorol*, 1971.
- [61] K. Sassen, «Polarization on Lidar: Range-Resolved Optical Remote Sensing of the atmosphere,» *Springer* , 2005.
- [62] M. Hoyos, *Improvement of lidar depolarization measurements: assessment of the polarizing-optic influence*, Medellín, 2019.

- [63] «scattport,» [En línea]. Available: <https://scattport.org/index.php/programs-menu/mie-type-codes-menu>. [Último acceso: junio 2019].
- [64] R. Acharya, «Capc3: Interaction of waves with medium,» de *Satellite Signal Propagation, Impairments and Mitigation*, 2017.
- [65] G. Mie, «Beiträge zur Optik trüber Medien, speziell kolloidaler Metallösungen,» *Annalen der Physik*, 1908.
- [66] M. Mischchenko, L. Travis y A. Lacis, *Scattering, Absorption and Emission of Light by small Particles*, NASA, 2002.
- [67] S. Prah, «Mie Scattering Calculator,» 2018. [En línea]. Available: https://omlc.org/calc/mie_calc.html. [Último acceso: 26 enero 2020].
- [68] M. Mischenko, L. Travis y A. Lacis, «T-Matrix Method and Lorenz-Mie theory,» de *scattering, absorption and emission of light by small particles*, 2000, pp. 115-189.
- [69] J. Gasteiger, M. Wigner, S. Gross, V. Freudenhale y C. Toledano, «Modelling lidar-relevant optical properties of complex mineral dust aerosols,» *Tellus*, 2019.
- [70] G. Gardner, «Simulation of natural scenes using textured quadric,» *Proceedings of the 11th annual conference on Computer*, 1984.
- [71] M. B. A. K. S.M. Shalabya, «Design recommendations for humidification-dehumidification solar water desalination systems,» *Energy Procedia*, 2016.
- [72] C. Forney y D. Brandl, «Control of humidity in small controlled environment Chambers using Glycerol-Waer solution».
- [73] H. Lui y M. H, «Experimental procedure of bubble column humidifier and dehumidifier under varying pressure,» *International journal of heat and mass transfer*, pp. 934-944, 2015.
- [74] aosong, *AM2305 Manual product*.
- [75] naylamp mechatronics, «naylamp mechatronics,» [En línea]. Available: https://naylampmechatronics.com/blog/46_Tutorial-sensor-de-temperatura-DS18B20.html. [Último acceso: 09 2019].
- [76] Área metropolitana Valle de Aburrá, «Inventario de emisiones atmosféricas,» [En línea]. Available: <https://www.metropol.gov.co/ambiental/calidad-del-aire/Paginas/Herramientas-de-gestion/Inventario-de-emisiones-atmosfericas.aspx>.
- [77] M. Gómez, M. Correa, J. C. r Saldarriaga y E. Posada, «DETERMINACIÓN DE LA CONTRIBUCIÓN DE FUENTES DE MATERIAL PARTICULADO PST Y PM10 EN TRES ZONAS DEL VALLE DE ABURRÁ: ZONA CENTRO- MEDELLÍN Y MUNICIPIOS ITAGÜÍ Y GIRARDOTA,» Politecnico Jaime Isaza Cadavid, Medellín, 2006.
- [78] Universidad Pontificia Bolivariana, «CAMPAÑAS DE MUESTREO DE BTEX EN ESTACIONES DE SERVICIO Y TERMINALES MAYORISTAS DEL VALLE DE ABURRÁ,» Área Metropolitana, Medellín, 2018.
- [79] F. Zapata, T. PAbón y J. C. Jaramillo, «Evaluar y monitorear la calidad del aire en el Valle de Aburrá,» Universidad Nacional, Medellín, 2011.

- [80] I. Garcés M, «CALCITA (CaCO₃),» 2000. [En línea]. Available: <https://intranetua.uantof.cl/salares/Fichas/Calcita.pdf>. [Último acceso: abril 2020].
- [81] Escuela de Química Universidad Nacional, «Hoja de seguridad,» [En línea]. Available: <file:///C:/Users/user/Downloads/Carbonato%20de%20calcio.pdf>. [Último acceso: 03 04 2020].
- [82] D. Zhao, A. Buchholz, T. F. Mentel, K.-P. Müller, A. Kiendler-Scharr, C. Spindler, R. Tillmann, A. Trimborn, A. Wahner y T. Zhu, «Hygroscopicity and CCN activity of CaCO₃ and Ca(HCO₃)₂ aerosols,» *EGU General Assembly Austria*, 2010.
- [83] M. Tang y J. D. Whitehead, «Cloud condensation nucleation activities of calcium carbonate and its atmospheric ageing products,» *Physical Chemistry Chemical Physics*, 2015.
- [84] R. Boucher, Aik-Chong-Lua y A. Stable, «High Concentration, dry aerosol generator,» *Journal of Aerosol science*, vol. 13, pp. 499-511, 1982.
- [85] A. Prenny, R. O. T. Siefert, M. Tolbert y D. Paul, «Design and Characterization of a Fluidized Bed Aerosol Generator: A source for Dry submicrometer Aerosol,» *Aerosol Science and Technology*, vol. 32, pp. 465-481, 2000.
- [86] D. García, «Modelo matemático de un sistema generador de aerosoles,» EAFIT, Medellín, 2019.
- [87] D. Yaobo y R. Michael, «jove.com,» 16 junio 2015. [En línea]. Available: <https://www.jove.com/video/54414/a-system-to-create-stable-nanoparticle-aerosols-from-nanopowders>. [Último acceso: 2019].
- [88] Y. Ding y M. Riediker, «A system to assess the stability of airborne nanoparticle,» *Journal of Aerosol Science*, pp. 99-108, 2015.
- [89] Alphasense, «Alphasense user manual: OPC-N2 Optical Particle counter,» 2015.
- [90] A. Behrendt y N. Takuji, «Calculation of the calibration constant of polarization lidar and its dependency on atmospheric temperature,» *Optics Express*, 2002.
- [91] R. Smartt y W. Steel, «Birefringence of Quartz and Calcite,» *J. Opt. Soc. Am.* 49, 710, pp. 710-712, 1959.
- [92] W. L. Bragg y L. F.R.S, «The Refractive Indices of Calcite and Aragonite.,» 1924. [En línea]. Available: <https://royalsocietypublishing.org/doi/pdf/10.1098/rspa.1924.0026>. [Último acceso: abril 2020].
- [93] A. Behrendt y N. Takuji, «Calculation of the calibration constant of polarization lidar and its dependency on atmospheric temperature,» *Optic Express*, 2002.
- [94] A. Langenbach, G. Baumgarten, F. J. F.-J. Lübken y C. Z. J. Von-Savigny, «Year-round stratospheric aerosol backscatter ratios calculated from lidar measurements above northern Norway,» *Atmos. Maes. Tech*, pp. 4065-4076, 2019.
- [95] J. L. Guerrero-Rascado, E. Landulfo, J. C. Antuña, B. Hernique, B. Barja, A. Bastidas, A. Bedoya, Da-Costa, Renata, René, Estevan, R. Forno, D. Gouveia, C. Jimenez y F. M.-R. H. Larroza, «Latin American Lidar Network (LALINET): diagnosis on network instrumentation,» *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, pp. 112-120, 2016.

- [96] H. Barbosa, F. Lopes, A. Silva, D. Nisperuza, B. Barja, P. Ristori, D. Gouveia, C. Jimenez, E. Montilla, G. Mariano, E. Landulfo y A. Bastidas, «The first ALINE measurements and intercomparison exercise on lidar inversion algorithms,» *Óptica Pura y Aplicada*, pp. 99-108, 2014.
- [97] R. Sullivan, M. Moore, M. Pösch, S. Kreidenweis, G. Roberts y K. Prather, «Effect of chemical mixing state on hygroscopicity and cloud nucleation properties of calcium mineral dust particles,» *Atmos. Chem. Phys*, vol. 9, pp. 3303-3316, 2009.
- [98] M. Wang, T. Zhu, D. Zhao, F. Rubach y A. Kiendler-Scharr, «Cloud condensation nuclei activity of CaCO₃ particles with oleic acid and malonic acid coatings,» *atmos. Chem. Phys*, pp. 7345-7359, 2008.
- [99] E. Gibson, G. Kelly, P. Hudson y V. Grassian, «Generation of Internally Mixed Insoluble and Soluble Aerosol Particles to investigate the Impact of Atmospheric Aging and Heterogeneous Processing on the CCN Activity of Mineral Dust Aerosol,» *Aerosol Science and Technology*, pp. 914-924, 2007.
- [100] K. Kandler, N. Benker, U. Bundke, E. Cuevas, M. Ebert, P. Knippertz y R. S. Rodriguez, «Chemical composition and complex refractive index of Saharan mineral Dust at Izaña Tenerife (Spain) derived by Electron Microscopy,» *Atmospheric Environment*, pp. 8058-8074, 2007.
- [101] M. Haarig, A. Ansmann, D. Althausen, A. Klepel, S. F. Groß, T. V., M. R.-E. D. A. Farrell, D. A. Prescod, E. Marinou, S. P. Burton, J. Gasteiger, R. Engelmann y and Baars, «Triple-wavelength depolarization-ratio profiling of Saharan dust over Barbados during SULTRACE in 2013 and 2014,» *Atmos. Chem. Phys*, vol. 17, 2017.
- [102] V. Freudenthaler, M. Esselborn, M. Wiegner, B. Heese, M. Tesche, A. Ansmann, D. Müller, D. Althausen, M. Wirth, A. Fix, G. Ehret, P. Knippertz, C. Toledano, J. Gasteiger, M. Garhammer y M. Seefeldner, «Depolarization ratio profiling at several wavelength in pure Saharan dust during SAMUM 2006,» *Tellus B*, pp. 165-179, 2009.
- [103] L. Chen, C. Peng, A. Nenes, W. Gu, H. Fu, X. Jian, H. Zhang, G. Zhang, J. Zhu, X. Wang y M. Tang, «On mineral dust aerosol hygroscopicity,» *Atmos. Chem. Phys. Discuss*, 2020.
- [104] S. P. Burton, J. W. Hair, M. Kahnert, R. A. Ferrare, C. A. Hostetler, A. L. Cook, D. B. Harper, T. A. Berkoff, S. T. Seaman, J. E. Collins, M. A. Fenn y R. R. Rogers, «Observation of the spectral dependence of linear particle depolarization ratio of aerosol using NASA Langley airborne High Spectral Resolution Lidar,» *Atmo. Chem. Phys*, pp. 13453-13473, 2015.
- [105] R. Mamouri y A. Ansmann, «Potential of polarization/Raman lidar to separate fine dust, coarse dust, maritime, and anthropogenic aerosol profiles,» *Atmos. Meas. Tech*, 2017.
- [106] M. Tesche, A. Kolgotin, M. Haarig, S. P. Burton, R. A. Ferrare, C. A. Hostetler y D. Müller, «3+2 + X: what is the most useful depolarization input for retrieving microphysical properties of non-spherical particles from lidar measurements using the spheroid model of Dubovik et al. (2006)?,» *Atmos. Meas. Tech*, vol. 12, pp. 4421-4437, 2019.

- [107] American Meteorological Society, «Meteorology glossary,» 25 04 2012. [En línea]. Available: http://glossary.ametsoc.org/wiki/Atmospheric_optics. [Último acceso: 28 10 2019].
- [108] C. F. Bohren, «Atmospheric Optics,» [En línea]. Available: https://application.wiley-vch.de/books/sample/3527403205_c01.pdf. [Último acceso: 28 09 2019].
- [109] Sustainable Development Indicator Group NASA, «nasa.gov,» 4 junio 1996. [En línea]. Available: <https://www.hq.nasa.gov/iwgsdi/Atmosphere.html>. [Último acceso: 2 11 2019].
- [110] D. Moulton, «wikipedia,» 01 01 2008. [En línea]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Stokes_parameters. [Último acceso: 10 12 2019].
- [111] S. Eric P y F. Robert W., «Models for the Aerosols of the lower atmosphere and the effects of humidity variations on their Optical Properties,» *environmental research paper*, 1979.
- [112] M. Hess, P. Koepke y I. Shult, «Optical properties of Aerosols and Clouds: The software package OPAC,» *American Meteorological Society*, 1998.
- [113] J. Kuśmierczyk-Michulec, «Ängström coefficient as an indicator of the atmospheric aerosol type for well-mixed atmospheric boundary layer: part1: Model development,» *oceanología*, 2009.
- [114] D. J. Segelstein, *the complex refractive index of water*, Kansas: Columbia university, 1981.
- [115] E. Montilla-Rosero, *Proyecto interno Universidad Eafit: Sistema Polarimétrico Para la Identificación y Clasificación De Aerosoles Atmosféricos*, Medellín: Universidad EAFIT, 2018.
- [116] A. P.S y S. R.J, «LIDAR,» Canadá, Universidad de Wester Ontario, 2001, pp. 869-889.
- [117] NASA, «Atmospheric Aerosols: What Are They, and Why Are They So Important?,» [En línea]. Available: <https://www.nasa.gov/centers/langley/news/factsheets/Aerosols.html>. [Último acceso: 11 2018].
- [118] T. Ina, L. Andrew A y F. Inez, «The Influence of Mineral Aerosol from Disturbed Soils on Climate Forcing,» *Nature*, p. 419–422, 1996.
- [119] K. P. Shine y P. M. d. F. Forster, «The effect of human activity on radiative forcing of climate change: a review of recent developments,» *Global and planetary change*, pp. 205-225, 1999.
- [120] Climate Change 2007: Working Group I: The Physical Science Basis, «Indirect Effects of Aerosols on Clouds and Precipitation,» de *IPCC Fourth Assessment Report: Climate Change 2007*, 2007.
- [121] U. N1, Y. X y H. KL, «Aerosol climate change effects on land ecosystem services.,» *Faraday discussions*, vol. 200, 2017.
- [122] M. Neuberger, «Human health effects of aerosols,» de *Advances of Atmospheric Aerosol Research in Austria*, Austrian Academy of Science, 2012, pp. 103-115.
- [123] S. Wang, C. A. Cuevas, U. Frieß y A. Saiz-Lopez, «MAX-DOAS retrieval of aerosol extinction properties in Madrid, Spain,» *Atmos. Meas. Tech*, 2016.
- [124] E. L. Fleming, S. Chandra y J. J. Barnett, «Zonal mean temperature, pressure, zonal wind and geopotential height as functions of latitude,» *Advances in Space Research*, 1990.

- [125] J. A. Rizzolo, «Mineral nutrients in Saharan dust and their potential impact on Amazon rainforest ecology,» *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2016.
- [126] J. Gasteiger y W. M., «MOPSMAP,» [En línea]. Available: <https://mopsmmap.net/v1.0/mopsmmap.php>.
- [127] K. S. L. D. C. E. M. H. Kandler, «Size distribution, mass concentration, chemical and mineralogical composition and derived optical parameters of the boundary layer aerosol at Tinfou, Morocco, during SAMUM 2006,» *Tellus B: Chemical and Physical Meteorology*, 2009.