



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL
ESTADO DE MORELOS

INSTITUTO DE INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS BÁSICAS Y
APLICADAS

CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS

CARACTERIZACIÓN Y MEDICIÓN DE IONES
NEGATIVOS ATMOSFÉRICOS MEDIANTE EL
CONDENSADOR CILÍNDRICO DE GERDIEN

T E S I S

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:

Maestro en Ciencias

PRESENTA:

Antonio Lira Verduzco

DIRECTOR DE TESIS:

Dr. Guillermo Guadalupe Hinojosa Aguirre



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL
ESTADO DE MORELOS

INSTITUTO DE INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS BÁSICAS Y
APLICADAS

CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS

CARACTERIZACIÓN Y MEDICIÓN DE IONES
NEGATIVOS ATMOSFÉRICOS MEDIANTE EL
CONDENSADOR CILÍNDRICO DE GERDIEN

T E S I S

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:

Maestro en Ciencias

PRESENTA:

Antonio Lira Verduzco

DIRECTOR DE TESIS:

Dr. Guillermo Guadalupe Hinojosa Aguirre

Dedico la presente obra a mi madre y hermana, quienes hemos permanecido juntos y en permanente cuidado mutuo pese a cada peripeteia que nos asoló.

A Jania por todo tu apoyo, empatía, paciencia y comprensión. Eres el amor de mi vida.

A mi padre, sé que estarías orgulloso de mí.

A mis maravillosas amistades de hace más de 15 años, no sé qué sería de mí si no fuera por ustedes.

Antonio Lira

Reconocimientos

Mi enorme agradecimiento a la Universidad Autónoma del Estado de Morelos a través del Instituto de Investigación en Ciencias Básicas y Aplicadas. A la Universidad Nacional Autónoma de México a través del Instituto de Ciencias Físicas por ser mi Alma Máter y donde realicé la estancia de investigación, respectivamente.

Al Dr. Antonio Marcelo Juárez y al Dr. Guillermo Hinojosa por haber sido mis directores/asesores de tesis, no tengo palabras para agradecer lo suficiente por su enorme paciencia y solidaridad con mi persona en momentos de extrema necesidad. Gracias por ayudarme a finiquitar este proyecto de investigación.

Mi más profundo aprecio a los miembros de mi Comité Tutoral, al Comité Revisor de Tesis y al Coordinador del Posgrado en Ciencias por su comprensión dadas mis dificultades personales y por su enorme sabiduría, la cual me ayudó a consolidar la presente obra. Gracias al Dr. Alejandro Ramírez, Dr. Ramón Hernández, Dr. Marco Antonio Rivera y al Dr. Eduardo Mora.

Agradezco al CONAHCyT y al PAECiF por las becas otorgadas.

Al Técnico Académico Ing. Armando Bustos y a mis compañeros de laboratorio Leonardo y Massimo por toda su ayuda en cuanto a la electrónica e instrumentación se refieren. A Hugo Hinojosa Galván por su apoyo en el taller mecánico.

Se agradece el apoyo parcial del CONAHCyT a través del proyecto: CF-2023-I-918, Iones negativos en la atmósfera: ciencia básica y aplicaciones.

Resumen

Presentamos un proyecto de investigación sobre la producción y caracterización de iones negativos (y positivos) atmosféricos, que son partículas cargadas eléctricamente, y que se forman en el aire por diversos procesos naturales y artificiales. La medición la llevamos a cabo mediante el condensador cilíndrico de Gerdien, un instrumento que mide la conductividad y la movilidad de los iones, así como técnicas espectroscópicas para identificar las especies iónicas y sus abundancias relativas. Como resultado de este trabajo, obtuvimos curvas características de voltaje contra corriente y sus respectivos espectros de movilidad iónica.

Con base en el presente estudio, concluimos que es factible medir la carga eléctrica atmosférica de manera controlada y efectiva utilizando el efecto corona y el condensador de Gerdien como herramientas útiles para tales mediciones. Este estudio ha demostrado que los valores observados dependen de parámetros que aún no han sido reportados en la literatura, lo cual sugiere que este campo posee un amplio margen para el desarrollo futuro. Además, no hemos encontrado, hasta donde podemos determinar, límites fundamentales o problemas técnicos que restrinjan el avance en el desarrollo de este tipo de detectores.

Las conclusiones de este estudio destacan la eficacia del condensador de Gerdien modificado para la detección fiable de iones atmosféricos. Se evidencia que, a pesar de las limitaciones intrínsecas de los métodos utilizados, los avances tecnológicos implementados ofrecen un margen considerable para la mejora y adaptación en estudios futuros. La investigación subraya la necesidad de continuar explorando este campo para optimizar las estrategias de medición y aumentar nuestra comprensión de los efectos ambientales y sanitarios de los iones negativos.

Por último, en el *addendum*, nombramos una multitud de posibles aplicaciones de los iones negativos en diversos campos como la calidad del aire, la salud humana, la industria, la predicción de terremotos y el cambio climático. Lo anterior fue parte de la motivación para la realización de este estudio.

Índice general

Índice de figuras	XI
Índice de tablas	XIII
1. Introducción y revisión de la literatura	1
1.1. El condensador cilíndrico de Gerdien para medir la conductividad del aire	2
1.1.1. Antecedentes del presente trabajo y estado actual del arte en el tema	3
1.2. Objetivos y motivaciones del trabajo	4
1.3. Estructura de la tesis, organización de la presente obra	4
1.4. Contribuciones	5
2. Marco teórico	7
2.1. Técnicas de medición de la carga electrostática atmosférica: Condensador de Gerdien y la movilidad iónica	7
2.1.1. Movilidad iónica [13]	9
2.1.1.1. Saturación de la corriente [13]	10
2.2. Análisis de las curvas características voltaje–corriente para la obtención del espectro de movilidad	15
2.3. Información básica sobre los iones atmosféricos	17
2.3.1. La física atmosférica acorde a R. G. Harrison y K. L. Aplin [10, 15]	18
2.3.2. Composición de los iones negativos y positivos del aire	19
2.4. Relación entre la movilidad y el radio molecular	20
2.5. Formación de iones atmosféricos y viento iónico por efecto corona [21, 22]	21
2.5.1. Generación de viento iónico	25
3. Materiales y Métodos	27
3.1. Diseño del modelo Gerdien	27
3.2. Caracterización de los componentes y ensamblaje del experimento	31
3.2.1. Fuentes de poder y modificaciones a un ionizador comercial	31
3.2.2. Calibración del picoamperímetro	33

3.2.3.	Sistema computacional de control automatizado mediante LabVIEW	34
3.2.4.	Flujo de viento, temperatura y humedad	36
4.	Análisis de Resultados	43
4.1.	Interpretación de curvas características Voltaje contra Corriente	44
4.1.1.	Experimentos de control, pruebas básicas de validación y de reproducibilidad	44
4.1.2.	Curvas de iones negativos producidos por efecto corona	46
4.1.3.	Curvas de iones positivos producidos por efecto corona	52
4.2.	Gráficas de los espectros de Movilidad iónica	54
4.2.1.	Proceso de cálculo y análisis de datos con MATLAB	54
4.3.	Análisis	57
4.4.	Discusión	62
5.	Conclusiones	65
5.1.	Resumen de los puntos principales y contribuciones	65
5.1.1.	Diseño del condensador de Gerdien	65
5.1.2.	Resumen de los resultados	65
5.2.	Evaluación de los métodos utilizados y propuestas para futuros estudios	67
5.3.	Reflexión final	69
	Apéndices	71
	Apéndice A. Historia del estudio de la física atómica y fisicoquímica	73
A.1.	La física atmosférica según Feynman [30]	75
	Apéndice B. Formación de aniones atmosféricos por procesos naturales y artificiales	77
	Apéndice C. Aplicaciones del estudio de los Iones Negativos	83
C.1.	Posible estudio de los terremotos	83
C.2.	¿Los iones negativos, un agente multimicrobicida?	84
	Apéndice D. Códigos de programación en MATLAB	91
D.1.	Código para ajustar un <i>cubic spline interpolation</i> y realizar el <i>downsampling</i> para su posterior análisis.	91
D.2.	Código para calcular el espectro de movilidades	96
	Bibliografía	105

Índice de figuras

2.1. Diagrama esquemático del condensador cilíndrico de Gerdien. Las trayectorias de las partículas cargadas (electrones, iones) son parabólicas.	8
2.2. Ejemplo de una de las posibles configuraciones de la dirección de la diferencia de potencial dentro del capacitor. En este caso, los iones negativos serían atraídos y colectados en el cilindro interior. Por supuesto, la polaridad es fácilmente invertible.	9
2.3. Características de la curva voltaje–corriente ideal medida con un condensador de Gerdien.	11
2.4. Características de la curva voltaje–corriente para un gas múltiplemente compuesto (más de una única especie iónica).	12
2.5. Método geométrico de la aproximación del voltaje crítico de saturación que se usa para estimar la movilidad promedio.	14
2.6. Relación entre la movilidad y el radio, originalmente deducida y calculada por [19, 20] y luego simplificada por [10] mediante un ajuste de ley de potencias, Ec. (2.26).	22
3.1. Diseñado en AutoCAD e impreso por la impresora 3D Snapmaker 2.0 A350, perteneciente al Laboratorio de Fotodinámica Molecular del ICF a cargo del Dr. Antonio Juárez. Se utilizaron dos unidades distribuidas a lo largo del cilindro con el fin de soportar el electrodo interior.	28
3.2. Diferentes perspectivas del modelo tridimensional. Los colores son indicativos de diferentes materiales; azul corresponde al acero inoxidable, rojo al teflón aislante y el beige es madera. En un inicio este era el prototipo, sin embargo, la montura de teflón afectaba significativamente el flujo de aire, por lo cual el diseño se cambió al de la Fig. 3.1.	29
3.3. Diferentes perspectivas de los Gerdien reales. Para este estudio, optamos por usar el modelo de mayor tamaño. Como ya se ha mencionado, al final nos deshicimos de la sección blanca que corresponde al teflón.	30
3.4. Se muestra el ionizador DF-FA8000D original capaz de proveer 1×10^8 iones negativos según declara el fabricante (cuando conectada a un tomacorriente). Veremos en el capítulo Resultados 4 que después de ser modificado, producirá alrededor de cinco órdenes de magnitud más.	32

3.5. Fuente de poder que provee la diferencia de potencial (± 8.4 kV) de alimentación para el cañón de iones. El cable con punta negra es la salida negativa y el rojo, la positiva. El cable enrollado que está por detrás es la conexión a tierra.	32
3.6. Fuente de poder que provee la diferencia de potencial de colección entre electrodos (± 5 kV). En este caso, se muestra la de polaridad positiva. Hace el barrido automatizado en el intervalo deseado a través de un voltaje de control externo.	33
3.7. El picoamperímetro Keithley 485, un instrumento de medición de corrientes muy bajas, esencial para detectar corrientes en el rango de 100 fA (0.1 pA).	34
3.8. Se muestran el esquema simplificado del circuito además de su implementación experimental. También la gráfica que compara los cálculos teóricos como las mediciones experimentales.	35
3.9. Programa gráfico de LabVIEW.	37
3.10. Se presenta la parte posterior del ordenador que tiene instalado el LabVIEW. Se puede observar a la caja blanca en la parte superior, donde se encuentra el módulo de adquisición de datos DAQ.	38
3.11. Se muestra el ensamblaje general del experimento.	39
3.12. Gráfica sobre la correspondencia entre el voltaje aplicado al ventilador y la velocidad de viento resultante (ver Tabla 3.2). Nótese el comportamiento lineal.	40
3.13. Instrumentos para la medición de parámetros ambientales y la velocidad de viento.	41
4.1. Iones negativos producidos por efecto corona para muy altos voltajes sin velocidad de viento. Medidas realizadas el mismo día.	45
4.2. Iones positivos producidos por efecto corona para muy altos voltajes sin velocidad de viento. Medidas realizadas el mismo día.	46
4.3. Representación gráfica de la corriente generada por iones negativos producidos por efecto corona, a -8 kV para varios flujos de viento. La toma de datos se realizó en el mismo mes de noviembre de 2023, separadas por una cantidad significativa de días para probar la reproducibilidad. . . .	47
4.4. Representación gráfica de la corriente generada por iones positivos producidos por efecto corona, a $+8$ kV para varios flujos de viento. La toma de datos se realizó en el mismo mes de noviembre de 2023, separadas por una cantidad significativa de días para probar la reproducibilidad. . . .	47
4.5. Representación gráfica de la corriente generada por iones negativos producidos por efecto corona, a -6 kV para varios flujos de viento y porcentajes de humedad. La toma de datos se realizó en conjuntos separados por meses con el fin de probar la reproducibilidad.	48

4.6. Representación gráfica en escala logarítmica de la corriente generada por iones negativos producidos por efecto corona, correspondientes a los voltajes de ionización de mayor magnitud utilizados en esta investigación, con variaciones en los flujos de viento.	49
4.7. Representación gráfica de la corriente generada por iones negativos producidos por efecto corona, a -7 kV para varios flujos de viento. En la presente instancia, se ha ajustado la escala de la curva correspondiente al flujo de viento nulo, simbolizada mediante rombos rojos, mediante la aplicación de un factor multiplicativo de tres para facilitar su visualización.	50
4.8. Representación gráfica de la corriente generada por iones negativos producidos por efecto corona, a -5 kV para varios flujos de viento. No fue posible detectar estructura para flujo de viento nulo.	50
4.9. Iones negativos producidos por efecto corona para altos voltajes intermedios, esto es, -4 kV o menos, promediados en intervalos de 60 V . Las medidas se realizaron el mismo día (22 de noviembre de 2023), una tras de otra, lo que logró un cambio mínimo de la humedad relativa y temperatura, donde todas se encuentran entre $59\% - 61\%$ y 22°C ; en el escala 2 nA del picoamperímetro con flujo entre 9 ó 18 V en el ventilador, lo que significa una velocidad de 3 y 6 ms^{-1} respectivamente.	51
4.10. Representación gráfica en escala logarítmica de la corriente generada por iones positivos producidos por efecto corona, correspondientes a los voltajes de ionización de mayor magnitud utilizados en esta investigación, con variaciones en los flujos de viento.	53
4.11. Comparación entre el espectro de movilidad iónica de Xiaoquian y el calculado por nuestro grupo, para los datos de Allen.	55
4.12. Submuestreo y espectro de movilidad asociado a los datos representados mediante los círculos negros en las Figs. 4.3 y 4.6.	56
4.13. Espectros de movilidad en el intervalo de -6 a -8 kV para diferentes flujos de viento correspondientes a la Fig. 4.6.	58
4.14. Espectros de movilidad en el intervalo de $+6$ a $+8\text{ kV}$ para diferentes flujos de viento correspondientes a la Fig. 4.10.	59
4.15. Espectros de movilidad para $\pm 5\text{ kV}$ para diferentes flujos de viento correspondientes a las curvas de menor magnitud de las Figs. 4.6 y 4.10.	60
4.16. Visualización de las tendencias de los radios iónicos para diferentes parámetros de ionización y flujo de viento.	61

Índice de tablas

2.1. Clasificación de los iones aéreos según su tamaño y movilidad.	18
2.2. Iones negativos atmosféricos y sus características. Los valores se obtuvieron de [24].	25
3.1. Parámetros del diseño del condensador de Gerdien. Todas las medidas están dadas en metros.	30
3.2. Equivalencia entre voltaje suministrado al ventilador y la velocidad de viento generada (ver Fig. 3.12).	40
4.1. Tabla de parámetros con sus respectivos intervalos de operación en sistemas de ionización.	43
4.2. Resultados para iones negativos con polarización negativa para el voltaje de colección con respecto al cilindro central. La columna “movilidad” corresponde al promedio ponderado de todas las movilidades de los iones, Ec. 2.24.	57
4.3. Resultados para iones positivos con polarización positiva para el voltaje de colección con respecto al cilindro central. La columna “movilidad” corresponde al promedio ponderado de todas las movilidades de los iones, Ec. 2.24.	62
C.1. Reportes de NAIs en organismos tomada y adaptada de [21].	86

Capítulo 1

Introducción y revisión de la literatura

Esta sección expone el tema de la presente tesis, el estado del arte, la motivación y los objetivos de la investigación. En este caso, la cuestión es el desarrollo de un condensador cilíndrico de Gerdien con el propósito de medir la carga atmosférica. Se presenta una revisión de la literatura sobre los iones de aire, su formación, propiedades y aplicaciones. Los objetivos de este trabajo son medir la carga eléctrica atmosférica y caracterizar las especies iónicas mediante técnicas espectroscópicas. La motivación es desarrollar técnicas instrumentales que puedan ser usadas en la cuantificación de iones. Presento el condensador cilíndrico de Gerdien como el instrumento estándar para medir la conductividad del aire y los atributos de los iones atmosféricos.

Este capítulo tiene como objetivo presentar al lector los principios fundamentales que rigen el diseño, construcción e implementación de un sistema de detección. Este sistema se basa en las propiedades de recolección de carga de una capacitancia cilíndrica coaxial, diseñado para ofrecer mediciones precisas y confiables de la carga eléctrica presente en el ambiente. Además, el sistema está equipado para identificar y caracterizar las especies iónicas atmosféricas generadas por un cañón de iones negativos atmosféricos, así como para determinar sus abundancias relativas.

Las concentraciones de iones negativos aéreos, se han medido con tanto ahínco a nivel del suelo en interiores y exteriores para abordar una amplia variedad de preguntas: estimar la calidad del aire (tasar la concentración de contaminantes) e incluso mejorarla, evaluar del impacto de los iones en la productividad laboral y salud humana, sus propiedades microbicidas, predicción de terremotos y el entendimiento de los procesos de intercambio en el circuito eléctrico global (que influye en el clima), entre otras.

Este proyecto busca responder a la siguiente interrogante esencial: ¿Cómo se pueden producir y detectar, de manera controlada y efectiva los iones negativos atmosféricos?

1.1. El condensador cilíndrico de Gerdien para medir la conductividad del aire

A lo largo de la historia, el estudio de la fisicoquímica atómica, molecular y atmosférica ha evolucionado significativamente, centrandose su atención en la medición y análisis de la carga atmosférica [1]. Las investigaciones iniciales del siglo XVIII, lideradas por figuras como Volta, Lavoisier y Laplace, exploraron la electricidad atmosférica y los gradientes de potencial eléctrico con relación a las condiciones climáticas [2]. Posteriormente, tras el descubrimiento de los rayos X en 1895, se observó su capacidad de generar portadores de carga, y en 1897, Rutherford relacionó los portadores de carga atmosférica con las partículas de aerosol. Aunque la teoría del ion-aerosol de Rutherford ha sido fundamental durante más de un siglo, aún se requiere una exploración más profunda de las interacciones entre iones y aerosoles atmosféricos. Referimos al lector hacia el Apéndice A para una explicación más detallada sobre los aspectos históricos relacionados con la detección de iones y aerosoles en la atmósfera, así como la importancia de estos estudios.

Una herramienta esencial en estos estudios es el condensador cilíndrico desarrollado por H. Gerdien en 1905 [3, 4], que mide la conductividad del aire mediante la detección de iones presente en un flujo que circula entre dos cilindros concéntricos, a los que se le aplica una diferencia de potencial. Esta herramienta puede determinar la movilidad, la densidad y la concentración de los iones, correlacionando la corriente medida con la concentración iónica.

Las propiedades electrostáticas de los iones se pueden utilizar para medir sus atributos generales. El modo más sencillo de contarlos es mediante un flujo de aire de velocidad conocida entre dos placas metálicas paralelas o dentro de un par de cilindros concéntricos conductores. Dicha cámara de capacitancia cilíndrica coaxial es un dispositivo clásico utilizado en la ciencia atmosférica. Puede almacenar carga cuando se aplica un campo eléctrico a través de sus electrodos. La corriente resultante es proporcional a la concentración de iones aéreos y a su movilidad eléctrica. Esto es, puede medir la movilidad, densidad y la concentración relativa de las diferentes especies de iones a partir de las curvas características de corriente-voltaje obtenidas. Utiliza un capacitor cilíndrico con un campo eléctrico radial para atraer un tipo de polaridad de iones cargados de manera contraria y son repelidos por el electrodo exterior, por lo que viajan hacia el electrodo central (también llamado electrodo colector) en forma de señal del orden de pA (picoamperes). Este dispositivo se ha convertido en el instrumento estándar para medir la conductividad del aire. El aparato completo en su versión más sencilla es capaz de medir los iones consiste en un condensador de Gerdien asociado a un electrómetro y una fuente de voltaje de polarización, los cuales se precisarán en el capítulo de la metodología.

1.1.1. Antecedentes del presente trabajo y estado actual del arte en el tema

La literatura en el campo ofrece una perspectiva histórica sobre la medición absoluta de la conductividad específica y la densidad de las corrientes eléctricas verticales en la atmósfera. Existen numerosas publicaciones sobre este tema, principalmente en el inicio del siglo XX. Vale la pena señalar que su investigación fue pionera y sentó las bases para estudios posteriores en electricidad atmosférica mediante la sofisticación subsecuente de sus instrumentos y métodos.

Gerdien midió la conductividad eléctrica de la atmósfera libre cerca de la superficie de la Tierra, por primera vez, en 1905. El instrumento tenía que ser eléctricamente estable durante periodos de al menos ocho horas, para que la calibración en mediciones a gran altitud no fuera necesaria, capaz de medir valores instantáneos de conductividad continuamente, con precisión y con una relación señal/ruido alta. Asimismo, se tiene que minimizar los efectos que incrementan el ruido, como lo son la radiación electromagnética externa, los efectos piezoeléctricos, las diferencias de potencial de contacto (*contact potential*, por su traducción al inglés), las corrientes de fuga a tierra (*ground leakage currents*, por su traducción al inglés) y las cargas inducidas electrostáticamente [5].

Le siguieron una multitud de grupos de investigación para las mediciones en diferentes partes del globo terráqueo a mayores altitudes mediante aviones militares [6, 7] y globos aerostático en forma de sondas, ya sea en condiciones de buen clima (*fair weather*, por su traducción al inglés) o durante tormentas eléctricas u otros fenómenos meteorológicos considerados anormales (Wigand y Callahan 9000 metros. Gish en el Explorer II 22000 metros) [8, 9]. Gracias a estos estudios se empezó a constatar la enorme diferencia de cantidad de carga en un inicio a lo largo de las diferentes capas de la tropósfera para en estudios en las décadas subsecuentes, alcanzar el límite de la ionósfera. Desde aquellos días ya se analizaba diferentes factores como la influencia de la presión, la temperatura, la humedad y los diferentes tipos de iones en la velocidad y el número de estos, así como la posible relación entre la conductividad y las radiaciones ultravioleta y penetrante del sol y las nubes de tormenta.

En la época moderna, a nuestro leal saber y entender, existen los siguientes grandes grupos de investigación a lo largo de todo el mundo. Presentamos en forma de árboles genealógicos académicos: Karen L. Aplin hizo su tesis de doctorado en el 2000 en Inglaterra, bajo la asesoría de R. Giles Harrison [10]; Urmas Hõrrak realizó su tesis doctoral en 2001 en Estonia, su asesor Hannes Tammet [11]; lo mismo para Zdeněk Roubal, 2015 en la República Checa, junto a Miloslav Steinbauer [12]; por último, Ma. Camille Lacdan, 2017 Japón, con Motoi Wada [13].

1.2. Objetivos y motivaciones del trabajo

- Diseñar de un prototipo detector Gerdien con el fin de determinar la carga atmosférica asequible, trasportable y fiable.
- Producir iones negativos (y positivos) atmosféricos de manera controlada y efectiva.
- Llevar a cabo el análisis de las mediciones de la carga eléctrica atmosférica obtenidas con el condensador cilíndrico de Gerdien.
- Caracterizar los iones producidos por descargas de efecto corona.

En el Apéndice C el lector podrá encontrar una discusión sobre el amplio número de aplicaciones al estudio de los iones negativos en varias ramas altamente significativas para el bienestar humano.

1.3. Estructura de la tesis, organización de la presente obra

La tesis que se presenta está organizada en cinco capítulos esenciales que abordan desde la introducción hasta las conclusiones, siguiendo un método sistemático y detallado en la investigación de la medición y caracterización de iones negativos atmosféricos utilizando el condensador cilíndrico de Gerdien. En el primer capítulo, Introducción y Revisión de la Literatura 1, se establece el contexto del estudio mediante la revisión de trabajos previos y se delinear el estado del arte en la medición de la carga eléctrica atmosférica. Además, se exponen los objetivos de la investigación y las motivaciones detrás del estudio, subrayando la importancia de los iones negativos en diversos campos de aplicación. El segundo capítulo, Marco Teórico 2, expone las bases teóricas necesarias para comprender los fenómenos estudiados. Aquí se incluyen descripciones detalladas de las técnicas de medición empleadas y la teoría que sustenta el funcionamiento del condensador de Gerdien, lo que es fundamental para entender cómo se miden las propiedades eléctricas de los iones atmosféricos. En el tercer capítulo, Materiales y Métodos (o Metodología) 3, se detallan los instrumentos y métodos experimentales utilizados en la investigación, desde la construcción y calibración del condensador Gerdien, hasta las metodologías empleadas para la recolección de datos y su análisis posterior. El cuarto capítulo, Análisis de Resultados 4, se centra en la interpretación de los datos obtenidos, analizando las características de los iones medidos y los resultados de las pruebas experimentales. Este análisis es crucial para validar las hipótesis planteadas y para comprender el comportamiento de los iones en condiciones controladas. El quinto capítulo, Conclusiones 5, resume los hallazgos principales, discute el impacto de la

investigación y ofrece recomendaciones para estudios futuros. Además, contrasta los objetivos inicialmente propuestos con los resultados obtenidos, destacando las contribuciones significativas del estudio al campo de la física atmosférica. Finalmente, en la última sección, encontraremos varios Apéndices que nutren y desarrollan a profundidad algunos aspectos del cuerpo principal que no son sustanciales para la narrativa principal. En su debido momento, se referirá al lector a ellos.

1.4. Contribuciones

La presente investigación contribuye, en opinión del autor, al campo de la física atmosférica y la ionización del aire mediante varias aportaciones clave:

- **Medición Precisa de Iones:** Se han medido con éxito iones negativos y positivos atmosféricos utilizando un condensador cilíndrico de Gerdien, proporcionando datos valiosos sobre sus características y comportamiento en la zona norte de Cuernavaca, cerca del bosque contiguo al Campus de la Universidad Autónoma del Estado de Morelos, así como al Instituto de Ciencias Físicas de la UNAM.
- **Caracterización de Espectros de Movilidad:** El análisis no solo incluyó corrientes totales y movilidad promedio de todas las especies, sino que, se ha caracterizado el espectro de movilidad de los iones, ofreciendo nuevas perspectivas sobre la distribución de tamaños y movilidades de los iones en la atmósfera.
- **Implementación de Metodología:** Se ha puesto en funcionamiento un método para la medición y análisis de la carga eléctrica atmosférica que puede ser aplicado en futuras investigaciones para mejorar la precisión de las mediciones de iones.
- **Aplicaciones Prácticas:** Los resultados del estudio tienen aplicaciones potenciales en la mejora de la calidad del aire, la salud humana entre otros, ya que promoví el diseño de un prototipo de medidor de carga atmosférica de bajo costo y confiable en las medidas recabadas.

Cada uno de estos puntos subraya el impacto y la importancia del estudio realizado, no solo en términos académicos sino también en aplicaciones prácticas que pueden beneficiar a la sociedad.

Capítulo 2

Marco teórico

Esta sección es la parte del documento donde se expone y se analiza la información básica sobre el tema de investigación, los conceptos, las teorías y algunos antecedentes que sustentan el desarrollo del trabajo. En este caso, se describe el condensador cilíndrico de Gerdien como el instrumento estándar para medir la conductividad del aire y las propiedades de los iones atmosféricos. También se mencionan las técnicas espectroscópicas que se utilizarán para identificar las especies iónicas. Se presenta un breve resumen de los mecanismos de producción, la composición y dinámica de los iones atmosféricos pequeños. Expongo la teoría de primeros principios alrededor del funcionamiento del condensador cilíndrico de Gerdien y desarrollo con detalle el concepto de movilidad. Planteo las formas de medición de la carga eléctrica atmosférica y los métodos para el análisis de los datos que devienen en la caracterización espectroscópica de las especies iónicas. Presento las limitaciones de los ionizadores comerciales, abordando la falta de especificación de iones, polaridad, especies y abundancia relativa.

2.1. Técnicas de medición de la carga electrostática atmosférica: Condensador de Gerdien y la movilidad iónica

Implementamos un espectrómetro de movilidad y contador de iones atmosféricos basado en el principio de aspirado del condensador de Gerdien cilíndrico (*Gerdien cylindrical capacitor*). El instrumento consta de dos cilindros coaxiales con una diferencia de potencial aplicada entre ellos. Las partículas cargadas son arrastradas al interior del cilindro mediante un flujo de aire, luego son atraídas hacia alguno de los dos electrodos con la carga opuesta. Lo anterior produce una corriente que es proporcional a la conductividad del aire. Referimos al lector a las Figs. 2.1 y 2.2, donde R_1 es el radio del cilindro interior, R_2 el del exterior, u es la velocidad del flujo de aire, L la longitud de

2. MARCO TEÓRICO

ambos cilindros y U la diferencia de potencial implementada entre los dos electrodos. Esta diferencia de potencial genera a su vez un campo eléctrico con dirección principalmente radial a excepción de los bordes. Un electrómetro o amperímetro que detecta corrientes desde el orden de picoamperes conectado al electrodo interior mide la carga en movimiento de las partículas.

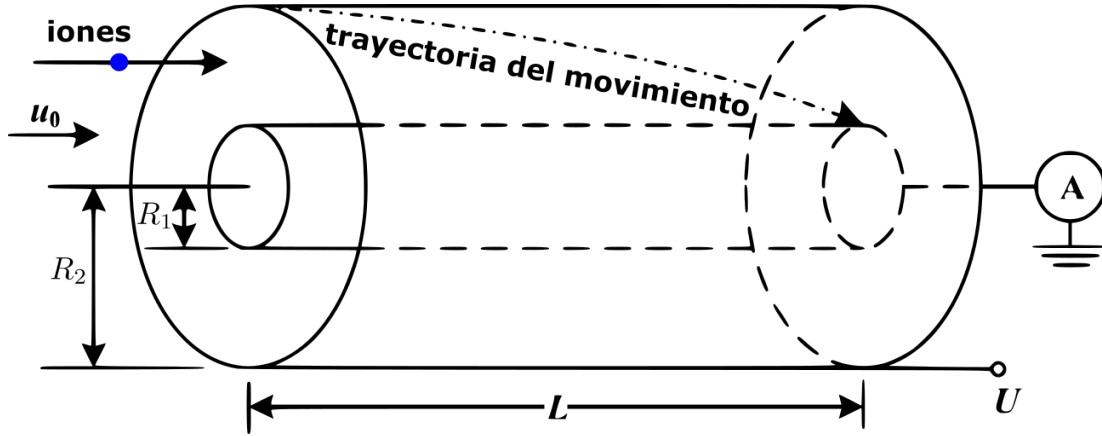


Figura 2.1: Diagrama esquemático del condensador cilíndrico de Gerdien. Las trayectorias de las partículas cargadas (electrones, iones) son parabólicas.

El aparato está diseñado para mediciones de concentración de iones aéreos por movilidad eléctrica. Las curvas características de corriente y diferencia de potencial proporcionan información sobre la conductividad y movilidad de los iones. Mientras que el método original de Gerdien consistía en calcular la conductividad a partir de la tasa de caída del voltaje, la práctica moderna usa una diferencia de potencial constante y mide la corriente electrónicamente. Esto conlleva una serie de beneficios, entre ellos, ser simple de construir, asequible y tener una alta sensibilidad y precisión para medir densidades de carga pequeñas (típicamente 1×10^{-14} A). Es capaz de operar automáticamente en condiciones de medición no ideales con alta fiabilidad y precisión. La medición de pequeñas corrientes generadas por los iones de aire en condiciones exteriores es exigente y causa muchos problemas relacionados con el cambio de temperatura, humedad relativa, variaciones en el viento y el ruido electromagnético. De momento presentamos a la Ec. (2.1) (será derivada más adelante), la cual es fundamental a lo largo de la tesis para calcular la movilidad μ [14].

$$\mu = \frac{u_0(R_2^2 - R_1^2) \ln(R_2/R_1)}{2LU}, \quad (2.1)$$

vemos que, para asegurar la recolección total de una especie iónica de interés específico, es posible escoger ya sea entre variar el voltaje entre cilindros, o variar el gasto

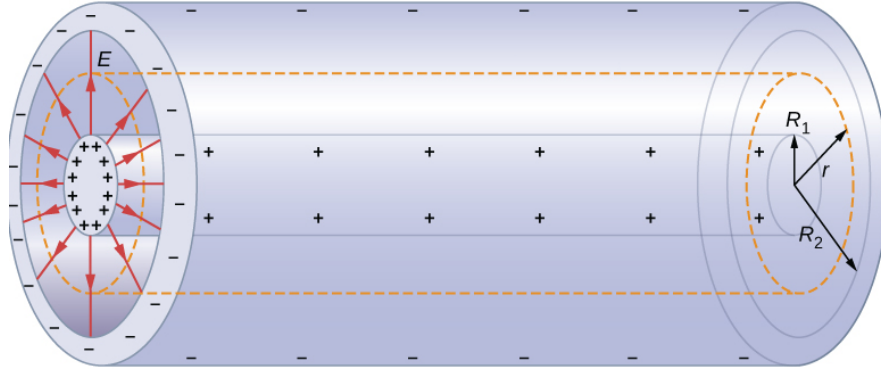


Figura 2.2: Ejemplo de una de las posibles configuraciones de la dirección de la diferencia de potencial dentro del capacitor. En este caso, los iones negativos serían atraídos y colectados en el cilindro interior. Por supuesto, la polaridad es fácilmente invertible.

del aire dejando al otro parámetro fijo.

2.1.1. Movilidad iónica [13]

Al aplicar un campo eléctrico uniforme y débil en todo un gas, se generará un flujo ininterrumpido de iones a lo largo de las líneas de campo. A simple vista, podría suponerse que un ion situado en un campo eléctrico experimentaría una fuerza evidente y, en consecuencia, se aceleraría alcanzando una velocidad en constante incremento. No obstante, el ion pierde parte o la totalidad del impulso adquirido debido a las colisiones continuas con las moléculas de aire. Como resultado, el ion se desplazará a una velocidad promedio en la dirección del gradiente de potencial. A lo anterior se le llama a velocidad de deriva en el régimen de Stokes, abreviada como u_d . Esta velocidad es la velocidad característica del enjambre de iones, no de iones individuales. Cada ion individual tiene una distribución de velocidades que puede diferir significativamente debido a variaciones en las interacciones moleculares y trayectorias individuales.

La intensidad del campo eléctrico es directamente proporcional a la velocidad de deriva (mientras la intensidad de campo eléctrico no rebase cierto umbral donde las fuerzas electrostáticas que actúan sobre la partícula equilibran las fuerzas de arrastre):

$$u_d = \mu E, \quad (2.2)$$

donde μ es la constante de proporcionalidad llamada *movilidad*. Para iones pequeños, la Ec. (2.2) solo aplica a menos de 10 kVcm^{-1} .

2. MARCO TEÓRICO

Por lo general, los aniones aéreos están cargados de manera simple y se pueden caracterizar (no de manera exclusiva) ya sea por su movilidad eléctrica o por su tamaño, siendo estas dos últimas cantidades inversamente proporcionales.

La densidad de corriente i , es definida como la cantidad de carga eléctrica que fluye por unidad de tiempo a través de un área de superficie perpendicular a la dirección del flujo:

$$i = q(\mu^+ n^+ + \mu^- n^-)E, \quad (2.3)$$

donde μ^\pm y n^\pm son las movilidades y las concentraciones de los iones positivos y negativos respectivamente, E la intensidad de campo eléctrico y q la carga del ion. Es aquí donde decimos que la corriente medida es proporcional tanto a la concentración de iones como a su movilidad. Como casi todos los iones encontrados en la atmósfera están cargados de manera sencilla, i.e., $|q| = e$, y dado el valor de la carga fundamental del electrón, podemos reescribir a la Ec. (2.3) como

$$i = (\sigma_+ + \sigma_-)E, \quad (2.4)$$

donde σ_\pm corresponde a la conductividad específica para iones positivos y negativos, respectivamente.

La Ec. (2.4) representa el caso cuando solo hay un tipo de iones positivos y un tipo de iones negativos. Si hay iones de diferentes movilidades y cada uno tiene una densidad correspondiente, entonces la Ec. anterior se puede expresar como

$$i = \sum_k (q_k^+ n_k^+ + q_k^- n_k^-)E \quad (2.5)$$

2.1.1.1. Saturación de la corriente [13]

Si se impone un voltaje a través de los electrodos de un condensador, se puede registrar una corriente que es directamente proporcional a la concentración de iones de aire (presentes en un flujo de aire a velocidad u) y su movilidad iónica. El dispositivo consiste en un cilindro hueco de radio R_2 , y un cilindro coaxial interno más pequeño con radio R_1 . A través de un ventilador o bomba succionadora, el aire es llevado entre los dos cilindros a una velocidad u . El cilindro interior, o una sección de él, mide la densidad de iones en forma de corriente, mientras que se establece un potencial entre los dos cilindros. Las conductividades y movilidades iónicas pueden ser inferidas a partir de las características de la corriente y el voltaje del condensador.

De forma ideal, si el aire con iones de una única especie entra al condensador a una velocidad constante u , la corriente en función del voltaje aplicado U se comportará como se muestra en la Fig. 2.3. La curva característica corriente–voltaje ($I - U$) es lineal

hasta que la diferencia de potencial crítico U_c alcanza el valor en el que se recogen todos los iones. A este valor terminal se le conoce como corriente de saturación.

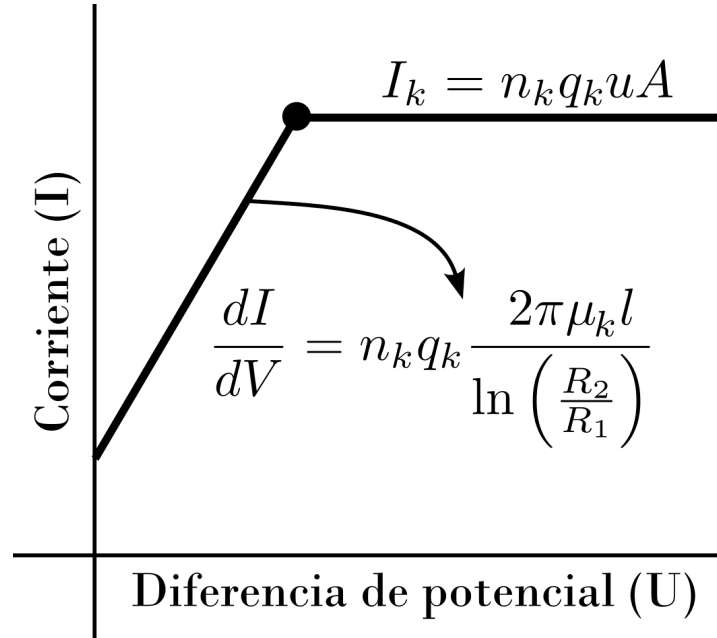


Figura 2.3: Características de la curva voltaje–corriente ideal medida con un condensador de Gerdien.

En un comienzo, la corriente iónica obedece la ley de Ohm y la conductividad se define conforme a la Ec. (2.4). No obstante, cuando el suministro de iones resulta insuficiente, la ley de Ohm no se satisface. Sabemos que el aire ionizado no cuenta únicamente con un solo tipo de especie química. De forma ilustrativa, imaginemos que un sistema está compuesto por tres especies iónicas diferentes con distintas movilidades; al trazar un gráfico de la corriente iónica frente a la diferencia de potencial, se obtendrá un resultado similar al mostrado en la Fig. 2.4.

En el caso de valores bajos de voltaje aplicado, existe una proporcionalidad estricta con la pendiente y la movilidad del ion. Sin embargo, debido a que el número de iones es limitado, se alcanzará la corriente de saturación en un determinado voltaje U_c . A partir de la corriente de saturación, es posible calcular la densidad total de iones positivos empleando la Ec. (2.5), con los términos para iones negativos igualados a cero y viceversa.

La corriente de saturación recolectada en el electrodo interno está dada por la Ec.

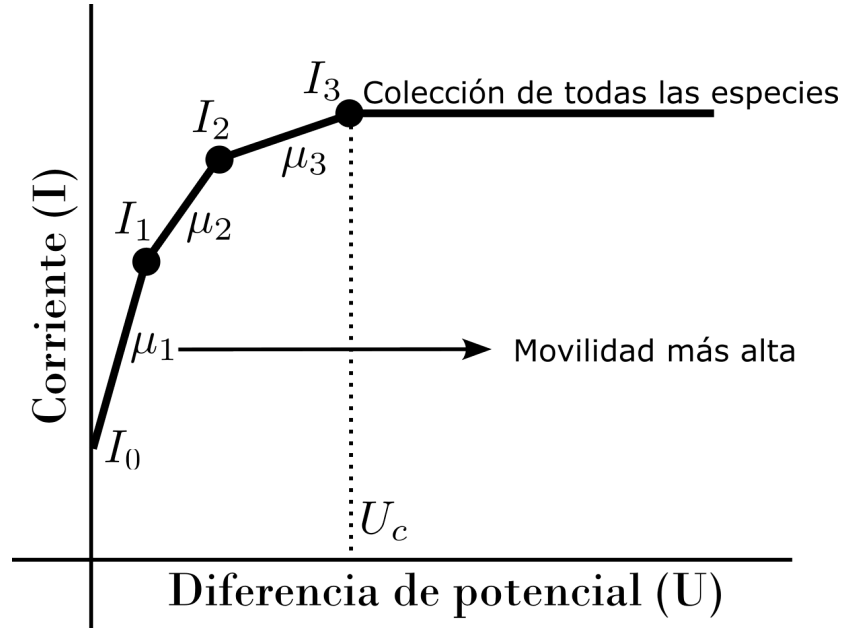


Figura 2.4: Características de la curva voltaje–corriente para un gas múltiplemente compuesto (más de una única especie iónica).

(2.6) donde A es el área de apertura del condensador de Gerdien, u es la velocidad de los iones que entran en el condensador (cabe destacar que el gasto, que es la relación que hay entre el volumen de un líquido que fluye por un conducto y el tiempo que tarda en fluir, se define como $Q = uA$), q_k es la carga y n_k es la densidad de iones de la especie k , respectivamente

$$I_k = n_k q_k u A \quad (2.6)$$

La movilidad iónica μ_k se define como el factor de proporcionalidad de la velocidad de deriva de un ion u_d en un gas y la intensidad del campo eléctrico radial E_r como se muestra en las Ecs. (2.2) y (2.7). Aquí, u_d nos da la componente radial de la velocidad del ion

$$u_d = \frac{dr}{dt} = \mu E_r \quad (2.7)$$

Un cálculo básico de la intensidad de campo eléctrico E_r a partir del potencial eléctrico U aplicado entre los electrodos del cilindro coaxial utilizando la ley de Gauss en el condensador de Gerdien proporciona la siguiente expresión:

$$E_r = \frac{U}{r \ln \left(\frac{R_2}{R_1} \right)}, \quad (2.8)$$

donde R_2 y R_1 son el radio exterior e interior del cilindro, respectivamente. Sustituyendo E_r en la Ec. (2.7) e integrando con respecto a r y t

$$\int r dr = \int -\frac{\mu U}{\ln\left(\frac{R_2}{R_1}\right)} dt, \quad (2.9)$$

$$\frac{1}{2}r^2 = -\frac{\mu U}{\ln\left(\frac{R_2}{R_1}\right)}t + c \quad (2.10)$$

Antes de que un ion entre en el cilindro, es decir, al tiempo $t = 0$, la longitud del electrodo del condensador $z = 0$, y la posición del ion a lo largo del eje radial $r = r(0)$, podemos obtener una expresión general para $r(0)$ dada por la Ec. (2.12),

$$\frac{1}{2}\left(r(0)^2 - r^2\right) = \frac{\mu U}{\ln\left(\frac{R_2}{R_1}\right)}t = \frac{\mu U}{\ln\left(\frac{R_2}{R_1}\right)}\frac{z}{u}, \quad (2.11)$$

$$r(0)^2 = r^2 + \frac{2\mu U}{\ln\left(\frac{R_2}{R_1}\right)}\frac{z}{u}, \quad (2.12)$$

donde la componente z de la velocidad del ion es simplemente u . Cuando los iones se recogen en el electrodo interior, es decir, cuando $r = R_1$ y $z = l$, podemos obtener la corriente eléctrica que fluye entre los electrodos debido a los iones n_k de las Ecs. (2.6) y (2.12)

$$I_k = n_k q_k u (\pi r(0)^2), \quad (2.13)$$

$$I_k = n_k q_k u \pi \left(r^2 + \frac{2\mu_k U}{\ln\left(\frac{R_2}{R_1}\right)}\frac{z}{u} \right) \quad (2.14)$$

Por lo tanto, la pendiente de la curva $U - I$ está dada por

$$\frac{dI}{dU} = n_k q_k \frac{2\pi\mu_k l}{\ln\left(\frac{R_2}{R_1}\right)} \quad (2.15)$$

La Ec. (2.15) demuestra que la pendiente de la característica $U - I$ del condensador de Gerdien conducirá a la determinación de la movilidad iónica.

En concreto, la corriente iónica en el electrodo colector proveniente de una única especie iónica ($k = 0$) puede ser expresada como

$$I = \begin{cases} \frac{2\pi en_0 \mu_0 LU}{\ln(R_2/R_1)}, & U < U_0 \\ en_0 \pi (R_2^2 - R_1^2) u_0, & U \geq U_0 \end{cases} \quad (2.16)$$

2. MARCO TEÓRICO

donde, en este caso $q = e$ la carga fundamental y la corriente es negativa o positiva según su signo. En términos prácticos, el aire ambiente es un gas con varios componentes iónicos. Cada especie de ion posee su propia movilidad, y la corriente total será el resultado del promedio de todas las especies de iónicas en cierta medida. Una curva teórica compuesta por segmentos de línea recta para tres movilidades se muestra en la Fig. 2.4. Una vez que se han recolectado los iones con la movilidad más alta, la pendiente de la curva cambiará gradualmente. Al aumentar la intensidad del campo eléctrico, se observa un punto de inflexión en la curva en el momento de recolección total de cada especie de iones, de movilidad cada vez menor. A medida que se incrementa la diferencia de potencial, que ejerce mayor fuerza, se logra atrapar a especies de iones más grandes, con más inercia y menos móviles; en consecuencia, la magnitud de la pendiente disminuye.

Una forma de estimar la movilidad promedio de forma geométrica, es interceptar una recta que aproxime a la pendiente dada de la ley de Ohm con una recta constante que toque en el máximo a la curva en su sección de saturada, para luego realizar una proyección como se muestra en la Fig. 2.5.

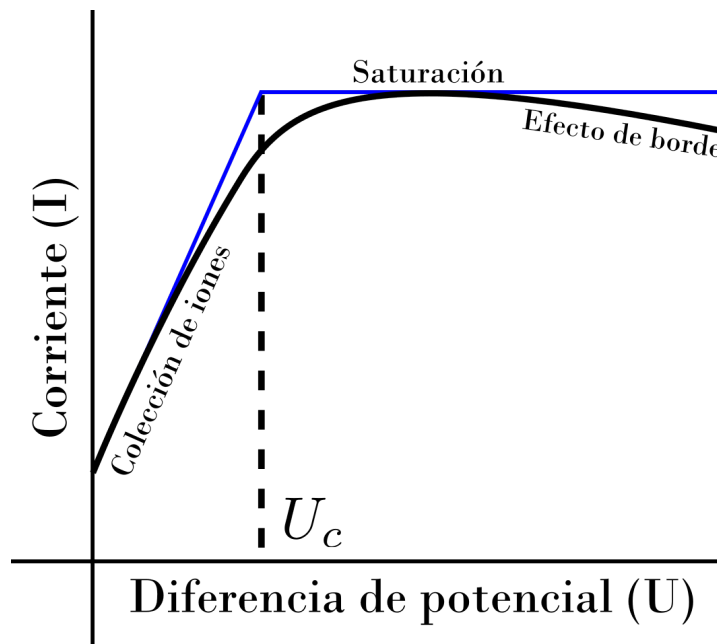


Figura 2.5: Método geométrico de la aproximación del voltaje crítico de saturación que se usa para estimar la movilidad promedio.

Si se invierte la polaridad del voltaje aplicado, entonces el electrodo colector recoge-

rá cargas del signo contrario al inicial. Las mismas ecuaciones se aplicarían tanto para las mediciones de iones negativos como positivos. Más aún, las propiedades características de la curva voltaje–corriente no cambiarán si se utiliza el electrodo colector como electrodo de polarización y viceversa.

Además, en la aplicación, cuando $U = 0$, ningún ion está siendo repelido por el electrodo interno, por lo tanto, la corriente total I_T recogida debido a la contribución de ambos iones positivos y negativos presentes en el aire ambiente está dada por:

$$I_k = \sum_k K_k (n_k^+ q_k^+ + n_k^- q_k^-) uA \quad (2.17)$$

Este fenómeno se manifiesta en el espectro como un desplazamiento vertical de la corriente, lo que modifica las características $U - I$ (voltaje–corriente). Este cambio puede ser causado por la recolección simultánea de partículas cargadas positiva y negativamente, que desde un comienzo estaban presentes en el aire dentro del conducto. La corriente total I_T , recogida en este caso, toma en cuenta la contribución de ambos tipos de iones presentes en el ambiente. Se supone que es proporcional a la corriente total que fluye hacia el condensador, multiplicado por algún factor determinado por la difusión o la carga espacial K_k .

En las mediciones reales, debido a que las velocidades iniciales no son uniformes y no están dirigidas completamente paralelas al condensador, la curva no se romperá tan bruscamente como se muestra en la Fig. 2.3. La curva característica experimental aparecerá como se muestra en la Fig. 2.4.

2.2. Análisis de las curvas características voltaje–corriente para la obtención del espectro de movilidad

El siguiente tratamiento de los datos está basado en la referencia [14] que derivó en la implementación del código en el Apéndice D.2, método mediante el cual calculamos los espectros de movilidad iónica en el Capítulo 4. En esta sección, se describe un método para obtener el espectro de movilidad de iones a partir de las mediciones de un tubo de Gerdien con un solo electrodo, basado en el análisis de la curva característica diferencia de potencial vs corriente ($U - I$) y el proceso de transición en ella.

Existe una fase de transición suave entre la etapa lineal del régimen de Ohm con respecto a la etapa de colección total de la carga disponible entre cilindros. Este método va más allá de obtener una movilidad promedio de todas las especies iónicas presentes (limitaciones del método original), debido a que nos permite saber cuáles de estas son más abundantes de forma relativa respecto a las otras. El método se basa en el análisis

2. MARCO TEÓRICO

de la transición entre el crecimiento lineal y la saturación de la corriente iónica, que se debe a la diversidad de especies iónicas con distintas movilidades y voltajes de saturación.

La Ec. (2.16) puede ser reescrita como la Ec. (2.1)

$$\mu = \frac{u_0(R_2^2 - R_1^2) \ln(R_2/R_1)}{2LU}, \quad (2.18)$$

nótese que las variables de movilidad y diferencia de potencial entre cilindros son inversamente proporcionales. Entonces, podemos explicar la fenomenología de la Fig. 2.4 de la siguiente manera: en la etapa I_0 , la pendiente de la curva característica total $U - I$ resulta de la superposición de las pendientes de los segmentos lineales de los tres iones. En la etapa I_1 , al saturarse completamente un ion y permanecer los otros dos en sus segmentos lineales, la pendiente total es la combinación de las pendientes de estos dos iones no saturados. En I_2 , otro ion alcanza la saturación completa, dejando solo un ion en su segmento lineal, cuya pendiente define ahora la de la curva total. Finalmente, en I_3 , todas las curvas de los iones se saturan, llevando la pendiente total a cero. Este progresivo cambio en la pendiente desde I_0 hasta I_3 representa matemáticamente el fenómeno de transición observado en la curva característica $U - I$ del tubo de Gerdien.

Suponiendo que hay N tipos de especies iónicas en el enjambre, la densidad numérica de cada ion es n_i ($i = 1, 2, 3, \dots, N$), la movilidad iónica es μ_i ($i = 1, 2, 3, \dots, N$), y el voltaje de saturación es U_i ($i = 1, 2, 3, \dots, N$). Se define $U_0 = 0$. Cuando el voltaje de polarización U está entre U_m y U_{m+1} , la corriente iónica I_m en el electrodo colector puede expresarse como

$$I = \begin{cases} \sum_{i=1}^N \frac{2\pi en_i \mu_i LU}{\ln(R_2/R_1)}, & m = 0 \\ \sum_{i=1}^m en_i \pi (R_2^2 - R_1^2) u_0 + \sum_{i=m+1}^N \frac{2\pi en_i \mu_i LU}{\ln(R_2/R_1)}, & m = 1, 2, 3, \dots, N \end{cases} \quad (2.19)$$

La Ec. (2.19) nos está sugiriendo que la siguiente relación existe entre la pendiente de la curva $U - I$ y el producto de la densidad y la movilidad iónicas para cualquier voltaje entre cilindros

$$\frac{\Delta I_m}{\Delta U} = \frac{2\pi eL}{\ln(R_2/R_1)} \sum_{t=m+1}^N n_t \mu_t \propto \sum_{t=m+1}^N n_t \mu_t \quad (2.20)$$

Además, la densidad numérica del ion m -ésimo se describe como

$$n_m = \frac{\sum_{i=m}^N n_i \mu_i - \sum_{i=m+1}^N n_i \mu_i}{\mu_m} \quad (2.21)$$

Por lo tanto, la densidad numérica del ion m -ésimo puede calcularse a partir de la pendiente de la curva $U - I$, es decir, para

$$\mu_m = \frac{u_0(R_2^2 - R_1^2) \ln(R_2/R_1)}{2LU_m} \quad (2.22)$$

Por consiguiente, según este método, se puede calcular la densidad de iones en cada movilidad iónica y obtener el espectro de movilidad iónica. La movilidad media del enjambre de iones se puede definir como la Ec. (2.23)

$$n_m = \begin{cases} \frac{U_m}{eu_0\pi(R_2^2 - R_1^2)} \left(\frac{\Delta I}{\Delta U} \Big|_{U_{m-1} \leq U \leq U_m} - \frac{\Delta I}{\Delta U} \Big|_{U_m \leq U \leq U_{m+1}} \right) & m = 1, 2, 3, \dots, N-1 \\ \frac{U_m}{eu_0\pi(R_2^2 - R_1^2)} \frac{\Delta I}{\Delta U} \Big|_{U_{m-1} \leq U \leq U_m} & m = N \end{cases} \quad (2.23)$$

$$\mu_{ave} = \frac{\sum_{i=1}^N n_i \mu_i}{\sum_{i=1}^N n_i} \quad (2.24)$$

Dada la Ec. (2.24), se puede observar que U_c , es equivalente a la diferencia de potencial crítica para la saturación promedio de la curva $U - I$, y, por lo tanto, la movilidad iónica media (μ_{ave}) se puede usar para resolver la Ec. (2.25) y luego contrastar contra el método gráfico, siendo que deberían devolver el mismo valor.

$$U_c = \frac{u_0(R_2^2 - R_1^2) \ln(R_2/R_1)}{2L\mu_{ave}} \quad (2.25)$$

El tratamiento anterior está implementado como la base matemática en el código para nuestros cálculos.

2.3. Información básica sobre los iones atmosféricos

Definimos a un ion como una molécula o átomo con un exceso de carga eléctrica neta debido a la ganancia o pérdida de electrones. Los iones con carga positiva se llaman cationes y los iones con carga negativa, aniones. En el Apéndice A el lector podrá encontrar un breve resumen de la historia de los avances en la investigación tanto de los iones como de la atmósfera terrestre.

Los iones negativos aéreos (NAI *Negative Air Ions*, por sus siglas en inglés) o aniones atmosféricos son predominantes en la materia constituyente de la ionósfera, en virtud de que el estado de agregación más común es el plasma. Las moléculas y átomos de carga neutra son preponderantes en nuestra atmósfera terrestre a nivel del suelo. El plasma en el espacio exterior es muy tenue, pero es la forma más común de materia

visible en el universo, presente en las estrellas y en el medio interestelar.

2.3.1. La física atmosférica acorde a R. G. Harrison y K. L. Aplin [10, 15]

Los iones en el aire se forman por diversos procesos, incluyendo rayos cósmicos, radioactividad y radiación ultravioleta del sol, así como descarga corona entre otros (véase el Apéndice B). Son un componente fundamental de la atmósfera y juegan un papel significativo en la conformación del ambiente atmosférico.

Dichos iones se pueden clasificar en dos grandes categorías, “iones pequeños” o “*cluster* de iones” (cúmulo de iones en racimo o agrupados) cuyo tamaño es menor a 1.6 nm y los “iones en aerosol” mayores que la última medida dada. En la Tabla 2.1 encontramos una clasificación dados sus tamaños y además se presentan sus respectivas movilidades (este último parámetro de medida se definirá a detalle más adelante). En general, los iones en aerosol de mayor tamaño tienen una distribución de carga eléctrica, mientras que los intermedios o pequeños son de carga elemental única.

Tabla 2.1: Clasificación de los iones aéreos según su tamaño y movilidad.

Clase de iones atmosféricos	Categoría	Diámetro (nm)	Movilidad ($\text{cm}^2 \text{V}^{-1} \text{s}^{-1}$)
Iones conglomerados	Pequeños	0.36 – 0.85	1.33 – 3.2
	Grandes	0.85 – 1.6	0.5 – 1.3
	Iones intermedios	1.6 – 7.4	0.034 – 0.5
Iones en aerosol	Ligeros	7.4 – 22	0.0042 – 0.034
	Pesados	22 – 79	0.00041 – 0.0042

Los iones pequeños se crean cuando partículas energéticas, originadas por la radioactividad natural y los rayos cósmicos, interactúan con las moléculas de aire. El proceso de radiólisis genera iones atómicos y electrones libres, que poseen una alta naturaleza polarizante. Como resultado, los ligandos de agrupamiento se unen rápidamente a estos iones mediante enlaces de hidrógeno.

Por otro lado, los iones grandes se forman cuando las partículas de aerosol preexistentes colisionan con iones pequeños. Durante esta colisión, el ion pequeño se adhiere a la partícula más grande. Estos iones resultantes poseen diversas composiciones químicas, dependiendo de la constitución original del aerosol, que puede incluir una variedad

de materiales tanto orgánicos como inorgánicos. Aunque la masa del ion pequeño contribuye de manera insignificante al peso total de la partícula combinada, el proceso de adhesión sí transfiere carga a la partícula más grande. Colisiones posteriores pueden resultar en la creación de iones grandes con múltiples cargas o incluso en partículas neutras si los iones combinados poseen polaridades opuestas. Los iones grandes exhiben una amplia gama de composiciones químicas.

Estas interacciones entre iones pequeños y grandes ocurren principalmente por cinética molecular, mientras que las fuerzas eléctricas solo se vuelven significativas al tratar con iones grandes altamente cargados. En este caso, la fuerza del campo eléctrico puede superar la considerable inercia de estos iones. Adicionalmente, cuando el aire contiene una alta concentración de partículas de aerosol, la cantidad de iones pequeños disminuye proporcionalmente, ya que las colisiones tienden a eliminarlos. Este fenómeno de eliminación de iones por el aerosol se utiliza en algunos tipos de detectores de humo domésticos.

La distinción entre iones grandes y pequeños se origina de diferenciar los iones que podrían ser acelerados por los campos eléctricos atmosféricos (y por lo tanto contribuir directamente a la conductividad del aire) y aquellos (los iones grandes) que no tenían suficiente movilidad eléctrica para coadyuvar a la conducción eléctrica en el aire de manera efectiva. Aunque la conductividad del aire se debe principalmente a su contenido de iones pequeños, como ya vimos, los iones grandes y las partículas de aerosol influyen indirectamente en la conductividad al eliminar los iones pequeños. En consecuencia, la conductividad del aire se ve afectada de forma inversamente proporcional por la presencia de iones grandes y partículas de aerosol. Al comprender estas interacciones entre iones pequeños y grandes, los investigadores pueden obtener información sobre procesos y fenómenos atmosféricos como la formación de aerosoles y la conductividad del aire.

2.3.2. Composición de los iones negativos y positivos del aire

Las especies químicas cargadas N_2^+ , O_2^+ , N^+ y O^+ son los cationes primigenios principales que se generan a partir de la ionización de los gases más habituales en la atmósfera. Es energéticamente propicio que estos iones reaccionen velozmente con el agua. La constante de tiempo de esta reacción, en la que las moléculas de agua se adhieren alrededor de los iones primarios, es del orden de nanosegundos y es proporcional a la humedad del aire. Los aniones y cationes más frecuentes en la troposfera son $H^+(H_2O)_n$ y $NO_3^-(HNO_3)_n$, donde $n < 10$. Los racimos de iones positivos tienen aproximadamente 8–12 moléculas de agua por cada cluster, mientras que los racimos de iones negativos tienen aproximadamente 6 a 7 moléculas. Nuevamente observamos que los iones negativos poseen mayor movilidad en promedio que los iones positivos en un ambiente natural para condiciones atmosféricas normales. En el aire donde hay

2. MARCO TEÓRICO

polvo o pequeñas gotas de aerosol presentes, estos iones ligeros se recombinan con ellos [16]; además del anión Cl^- y el catión Na^+ (originados de la evaporación del agua de mar y el cloruro por la emisión de compuestos y desechos de origen humano); podemos mencionar, también, los siguientes iones: el anión SO_4^{2-} (derivado de la oxidación del dióxido de azufre SO_2 , un subproducto de la combustión de combustibles fósiles y erupciones volcánicas) [17]; el catión amonio NH_4^+ (viene principalmente de la reducción de amoníaco NH_3 , que proviene de fuentes tanto naturales como antropogénicas, incluidas la agricultura y la ganadería) [18]; el catión Ca^{2+} (deriva principalmente de la erosión de minerales y rocas, así como de la disolución de partículas atmosféricas) [17]. Estos iones de agregados moleculares suelen tener un radio cercano a 0.5 nm y una masa de unas pocas unidades de masa atómica [11].

La estructura química de los iones atmosféricos pequeños se caracteriza por agrupaciones de moléculas que se reúnen alrededor de un ion cargado único. Estos conglomerados se forman rápidamente, en microsegundos después de la ionización, y tienden a tener vidas medias del orden de cien segundos. Los conglomerados cargados positivamente suelen tener una estructura química denotada como $\text{I}^+(\text{X})_n$, donde I^+ representa una especie atmosférica común como los cationes H_3O^+ , NO^+ ó NO_2^+ . En esta estructura, X se refiere a un gas traza con alta afinidad por carga positiva, comúnmente encontrado en la atmósfera, que incluye sustancias como amoníaco o vapor de agua. La tasa a la que estas moléculas se unen y la especie de ion específico que se crea dependen de la concentración y afinidad de los gases traza presentes. De manera similar, los iones cargados negativamente pueden describirse mediante la fórmula $\text{I}^-(\text{Y})_n$, donde el anión puede ser O^- , O_2^{*-} , O_3^- , CO_3^{2-} , NO^- , NO_2^- ó NO_3^- y el ligando es una especie atmosférica electronegativa como SO_2 , HNO_3 o vapor de agua. En este caso, el valor de n varía típicamente de 4 a 10. Debido a las diferencias químicas entre las especies presentes en los iones positivos y negativos, pueden observarse ciertas asimetrías físicas en estos iones. Los estudios mostraron que los NAIs atmosféricos también incluían iones adicionales como OH^- , HCO_3^- y HSO_4^- además de conglomerados de agua como ligandos.

2.4. Relación entre la movilidad y el radio molecular

En la presente sección, se aborda la dificultad de vincular directamente la movilidad iónica con otras propiedades físicas inherentes a los iones, como su masa y radio. Tradicionalmente, la movilidad no se considera una cantidad intuitiva para tales correlaciones, lo que resalta la necesidad de desarrollar métodos que faciliten este tipo de comparaciones. En 1995, el Profesor Tammet desafió el modelo convencional (Stokes-Millikan) de partículas nanométricas, donde las definiciones de tamaño molecular y movilidad iónica necesitaban reconsiderarse [19]. Propusieron un modelo semiempírico para estimar los radios de colisión y masa de las partículas. Incluyeron formulaciones

matemáticas extensas y complejas, y un análisis de datos empíricos para respaldar las predicciones del modelo y su aplicación para estimar comportamientos de partículas en diversas condiciones. En 1999, su otrora alumno de doctorado, Hórrak y él, continuaron con la línea de investigación [20]. Exploraron en profundidad la relación matemática entre la movilidad iónica y el radio de las partículas de aerosol, que es fundamental para entender cómo los espectros de movilidad iónica pueden informar sobre las distribuciones de tamaño de los aerosoles atmosféricos. Se calcularon tanto el tamaño como la movilidad de los iones utilizando la fórmula original de Tammet. Describieron cómo la movilidad de los iones intermedios y grandes representativos de partículas cargadas en un rango de 2 a 100 nm puede ser utilizada para estimar el tamaño de estas partículas.

En 2001, la profesora Aplin, en el apartado de análisis de datos de su tesis doctoral [10], optó por simplificar la expresión matemática derivada de los anteriores estudios mediante la aplicación de un ajuste de ley de potencias a la relación entre la movilidad iónica y el radio de los iones. Este enfoque proporciona una metodología simplificada y accesible para establecer una correlación directa entre estas dos variables críticas, representada por la ecuación

$$r = 0.4972\mu^{-0.5715}, \quad (2.26)$$

con un coeficiente de determinación (R^2) de 0.9962, indicando un ajuste muy preciso. Esta relación es clave para convertir la movilidad iónica en un radio más intuitivamente comprensible. La r se encuentra en nanómetros y la μ en ($\text{cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$). La gráfica se encuentra en la Fig. 2.6.

Existe una correlación negativa entre el radio de los iones y su movilidad. Los iones más pequeños parecen tener mayor movilidad. Esto es coherente con la idea de que partículas más pequeñas experimentan menos resistencia y pueden moverse más libremente.

2.5. Formación de iones atmosféricos y viento iónico por efecto corona [21, 22]

De modo natural, los iones se consolidan en la naturaleza principalmente debido a los rayos cósmicos que impactan las diferentes capas de la atmósfera, el decaimiento radiactivo de una variedad de isótopos presentes en el suelo, rayos de tormentas eléctricas responsables del efecto corona, fuerzas cortante del agua consigo misma o superficies como pasa en las cascadas entre otras. En la presente obra, nuestro mecanismo de creación de iones es el efecto descarga corona. En el Apéndice B el lector podrá hallar este párrafo mucho más desglosado.

2. MARCO TEÓRICO

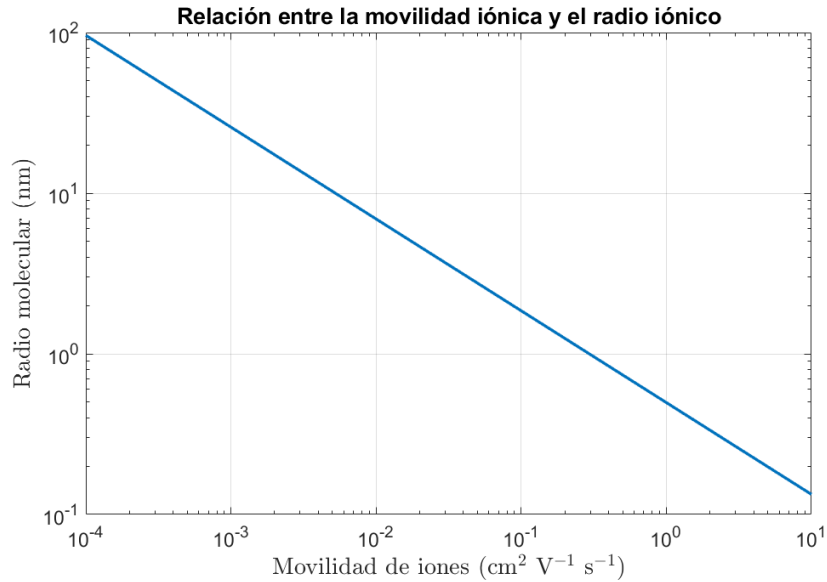


Figura 2.6: Relación entre la movilidad y el radio, originalmente deducida y calculada por [19, 20] y luego simplificada por [10] mediante un ajuste de ley de potencias, Ec. (2.26).

Una descarga de corona se define como un proceso que se inicia cuando la intensidad del campo eléctrico cerca de un conductor es suficientemente alta para ionizar el gas circundante, pero no lo suficientemente alta como para causar una ruptura dieléctrica completa o chispas. Este proceso depende en gran medida de la geometría de los electrodos, con puntos afilados o bordes que aumentan la intensidad del campo eléctrico y, por lo tanto, facilitan la ionización a voltajes más bajos.

Existen condiciones físicas necesarias para los diferentes tipos de descargas de corona, como las positivas y negativas, y los roles respectivos del movimiento de iones y electrones en estos procesos. Por ejemplo, en una corona positiva, la ionización ocurre principalmente alrededor del ánodo con iones positivos moviéndose hacia afuera, mientras que, en una corona negativa, los electrones emitidos desde el cátodo conducen a fenómenos de ionización. Los factores clave que influyen en la descarga de corona incluyen la distribución del campo eléctrico, la geometría del electrodo, las propiedades del material y las condiciones ambientales. La forma y agudeza de los electrodos son cruciales, ya que los puntos afilados incrementan la intensidad del campo eléctrico local, reduciendo el voltaje necesario para la descarga. Las características del material, como la conductividad eléctrica y la resistencia dieléctrica, también afectan la facilidad de ionización bajo estrés eléctrico. Adicionalmente, las condiciones del entorno, como la presión y la humedad del aire donde se ubican los electrodos, juegan un papel significativo en la ocurrencia de la descarga de corona.

En la zona de ionización, se observa que los iones/electrones libres, generados durante el proceso de ionización, son absorbidos por el electrodo emisor y neutralizados con la carga presente en el mismo, o bien son repelidos fuera de la zona por la fuerza de Coulomb, desplazándose hacia el electrodo colector. La extensión de la zona de ionización se encuentra íntimamente relacionada con el voltaje aplicado, expandiéndose gradualmente a medida que se incrementa dicho voltaje. Fuera de la zona de ionización, la intensidad del campo eléctrico se reduce considerablemente y no alcanza una magnitud suficiente para descomponer el aire y provocar ionización adicional, limitándose la actividad a movimientos de partículas cargadas bajo la influencia de la fuerza de Coulomb y sus colisiones con moléculas de gas neutras para el intercambio de momento. Es posible que los iones repelidos se combinen con moléculas de agua a través de colisiones, formando iones hidratados.

La producción de NAIs mediante la técnica de descarga corona puede ser implementada a través de diversas configuraciones estructurales:

- **Configuración Punto a Plano:** (por su traducción al inglés *Point to Plane*) Esta metodología involucra la aplicación de un voltaje elevado entre un elemento puntiagudo y una superficie planar. Tal disposición induce un gradiente eléctrico intenso en el medio aéreo circundante, resultando en la ionización de este.
- **Sistema de Alambre a Cilindro:** (por su traducción al inglés *Wire to Cylinder*) Este sistema se asemeja en principio al de punto a plano, pero incorpora un alambre central rodeado por un cilindro. Esta variante facilita una distribución más homogénea de los iones generados, lo cual es crucial para aplicaciones que requieren uniformidad en la ionización.
- **Campos Eléctricos Pulsados:** (por su traducción al inglés *Pulsed Electric Fields*) La aplicación de campos eléctricos de manera pulsada, en contraste con la utilización de un campo continuo, permite un control más preciso sobre las tasas de producción de iones. Adicionalmente, este enfoque contribuye a la optimización de la eficiencia energética del proceso.

Nosotros decidimos utilizar un conjunto de fibras de carbono finas como se muestra en la Fig. 3.4 debido a su alta eficiencia de producción y bajo costo.

Las especies de iones negativos generadas por la descarga de corona han sido identificadas mediante espectrometría de masas por varios experimentos. La mayoría de los iones negativos son CO_3^- y otros iones negativos incluyen O^- , O_3^- , NO_3^- [23]. Informes del profesor Nagato mostraron que las composiciones de iones negativos son diferentes en diferentes tiempos de reacción de ionización de corona según lo observado por espectrometría de masas. Según sus resultados, NO_3^- es el ion mayor seguido por HCO_3^- y otros.

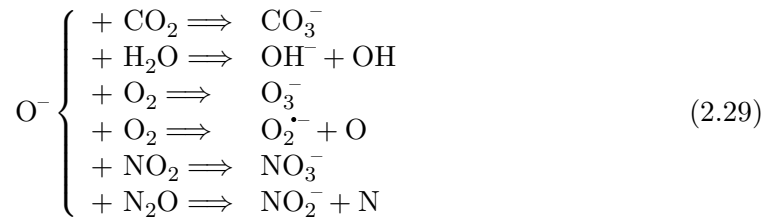
2. MARCO TEÓRICO

Los NAIs pueden evolucionar de un NAI a otro. Por ejemplo, como se muestra en la Ec. (2.27), el O^- se forma cuando una molécula de oxígeno O_2 se disocia en dos y una de ellas obtiene un electrón. El NAI O^- puede contribuir a la formación de NAIs secundarios mediante procesos de unión de electrones asistidos por colisiones cuando otras moléculas existen en el mismo espacio. Como resultado, se generan otros NAIs como $O_2^{\bullet-}$, O_3^- , CO_3^{2-} , OH^- , HCO_3^- , NO_2^- y NO_3^- . De hecho, la evolución de los NAIs está relacionada con la composición del aire circundante. Los NAIs están cambiando continuamente a medida que chocan con moléculas en el aire. Por lo tanto, los NAIs son dinámicos en su composición, que depende del potencial de ionización y afinidad electrónica, la afinidad protónica, el momento dipolar y la polarizabilidad, así como la reactividad de la molécula [21].



En la Ec. (2.28), se añade un electrón e^- a una molécula de oxígeno, pero en presencia de un tercer cuerpo (M), formando un ion superóxido O_2^- . El tercer cuerpo “M” (típicamente una molécula como el nitrógeno diatómico u otro gas inerte), absorbe parte de la energía liberada en este proceso exotérmico, estabilizando así el ion superóxido recién formado. Sin “M”, el superóxido podría no formarse tan fácilmente porque el exceso de energía podría hacer que los reactivos se separasen de nuevo en sus formas originales.

En la Ec. (2.29), presentamos los canales principales para la formación de iones negativos en base al anión de oxígeno, en la Ec. (2.30) un par de ejemplos de reacciones secundarias y posteriores.



La diferente composición química de los iones negativos reduce el número promedio de moléculas de agua unidas al catión central. En consecuencia, los iones negativos son ligeramente más pequeños que los positivos y pueden moverse más rápido en un campo eléctrico, i.e., en promedio tienen mayor movilidad ($1.9 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1} > 1.4 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$ respectivamente) [10].

Tabla 2.2: Iones negativos atmosféricos y sus características. Los valores se obtuvieron de [24].

Espece Química	Masa Molecular (u)	Movilidad ($\text{cm}^2 \text{V}^{-1} \text{s}^{-1}$)	Radio (nm)	Nombre
O^-	16	3.2	0.14	Ion óxido
OH^-	17	2.7	0.15	Ion hidróxido
NO^-	30	2.6	0.16	Ion óxido nítrico
$\text{O}_2^{\cdot-}$	32	2.16	0.16	Ion superóxido
O_3^-	48	2.55	0.18	Ion ozonuro
NO_2^-	46	2.6	0.17	Ion nitrito
CO_3^{2-}	60	1.5	0.20	Ion carbonato
HCO_3^-	61	1.6	0.21	Ion bicarbonato
NO_3^-	62	2.0	0.18	Ion nitrato
SO_4^{2-}	96	1.0	0.23	Ion sulfato
HSO_4^-	97	1.1	0.23	Ion hidrógeno sulfato

2.5.1. Generación de viento iónico

El viento iónico es un proceso secundario, resulta del movimiento de partículas ionizadas (iones y electrones) en la descarga de corona que colisionan con moléculas neutras, transmitiendo momento y creando un flujo de aire. Su generación va acompañada de procesos físicos complejos que incluyen la ionización de gases, la recombinación de iones, el flujo y diversas reacciones químicas, así como acoplamientos mutuos entre algunos de ellos. Este proceso convierte efectivamente la energía eléctrica en energía cinética de las moléculas de aire, resultando en un flujo similar al viento. Los parámetros clave que influyen en la eficiencia y la fuerza del viento iónico, incluyen la densidad de partículas ionizadas, la intensidad del campo eléctrico y la disposición física del conjunto de electrodos.

La influencia en la eficiencia y la direccionalidad del proceso de transferencia de momento puede ser afectada por varios factores. Se ha encontrado que una mayor densidad del aire implica una mayor cantidad de moléculas de aire disponibles para colisionar con partículas cargadas, lo que potencialmente aumenta la transferencia de momento y, por ende, la fuerza del viento iónico. En contraste, una menor densidad del aire puede disminuir estas interacciones, resultando en un viento iónico más débil. El contenido de vapor de agua en el aire puede influir en el comportamiento de las partículas cargadas y en el proceso de ionización mismo. Se ha determinado que una mayor humedad puede causar la formación de agrupaciones de agua alrededor de los iones, alterando su masa

2. MARCO TEÓRICO

y la dinámica de su movimiento. Esto puede modificar la eficiencia de la transferencia de momento, ya que los cúmulos de agua e iones más pesados pueden colisionar con moléculas neutras de manera diferente en comparación con los iones simples y más ligeros.

Materiales y Métodos

3.1. Diseño del modelo Gerdien

En esta sección presentamos el diseño geométrico del modelo prototipo Gerdien cuyos parámetros se encuentran en la Tabla 3.1, el de mayor tamaño desarrollado gracias al software AutoCAD, el cual se muestra en la Fig. 3.2. La manufactura de ambos estuvo a cargo del taller de mecánica del Instituto de Ciencias Físicas de la UNAM, Fig. 3.3. Optamos por el modelo de mayor tamaño debido a que sus parámetros geométricos son semejantes al modelo de Gerdien original de 1905, además de contar con materiales de mayor calidad.

Elegimos al ácido poliláctico, también conocido como poli(ácido láctico) (PLA *polylactic acid*, por sus siglas en inglés) como material de soporte y aislante entre electrodos como se muestra en la Fig. 3.1, ya que nos permitió una mínima obstrucción al flujo de aire. Se trata de un poliéster termoplástico con una fórmula estructural basada en el ácido láctico. El PLA se ha popularizado debido a su producción económica a partir de recursos renovables. Es el material plástico más utilizado en la impresión 3D por modelado por deposición fundida (FDM *fused deposition modeling*, por sus siglas en inglés), debido a su bajo punto de fusión, alta resistencia, baja expansión térmica y buena adhesión entre capas. Sin embargo, tiene una resistencia térmica de alrededor de 60°, lo cual es relativamente baja en términos de procesos industriales. Esto no representa ningún problema para nuestro experimento.

El PLA posee una resistividad eléctrica de aproximadamente $5 \times 10^{17} \mu\Omega \text{ cm}$, lo cual lo hace un buen aislante [25]. Para calcular la resistencia total del anillo con las dimensiones y propiedades especificadas, usaremos la fórmula de la resistencia eléctrica para un material homogéneo e isotrópico, dada por

$$R = \rho \frac{L}{A}$$

3. MATERIALES Y MÉTODOS

donde, ρ es la resistividad eléctrica del material, L es la longitud del camino por el cual fluye la corriente y A es el área de la sección transversal por donde pasa la corriente. El diámetro del anillo es el mismo que el Gerdien, 0.104 m, su altura de 0.005 m. La resistencia total del anillo con las especificaciones dadas es aproximadamente $3 \text{ G}\Omega$. Este valor es el resultado de calcular la resistencia usando la fórmula estándar de resistencia para un conductor, tomando en cuenta la resistividad dada y las dimensiones del anillo.

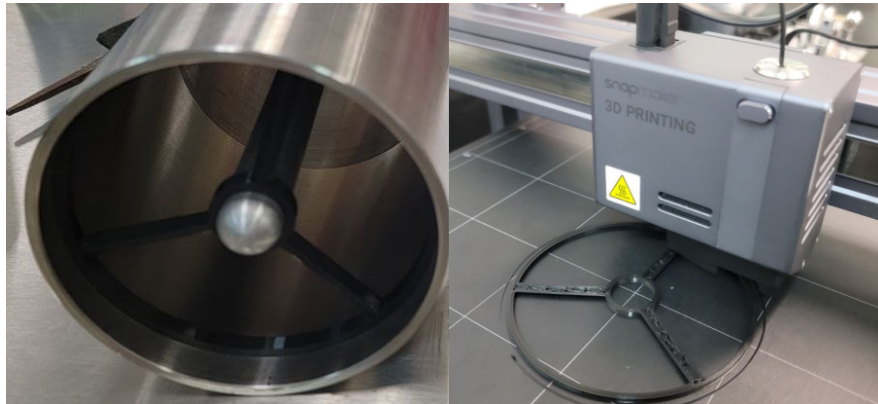


Figura 3.1: Diseñado en AutoCAD e impreso por la impresora 3D Snapmaker 2.0 A350, perteneciente al Laboratorio de Fotodinámica Molecular del ICF a cargo del Dr. Antonio Juárez. Se utilizaron dos unidades distribuidas a lo largo del cilindro con el fin de soportar el electrodo interior.

En cuanto al acero inoxidable, es un material muy utilizado en la fabricación de electrodos debido a sus propiedades y ventajas. Algunas de las ventajas más destacadas son su conductividad eléctrica y resistencia a la oxidación, lo que permite que resista perfectamente la corrosión provocada por la humedad y el oxígeno. También es resistente a altas temperaturas, ya que se funde al alcanzar los 1,500 grados centígrados aproximadamente, lo que permite aguantar muy bien el calor.

La punta redondeada del cilindro interior está pensada para ser aerodinámica, esto es, su objetivo es disminuir la turbulencia y promover un flujo lo más idealmente laminar posible, para evitar errores en la medida.

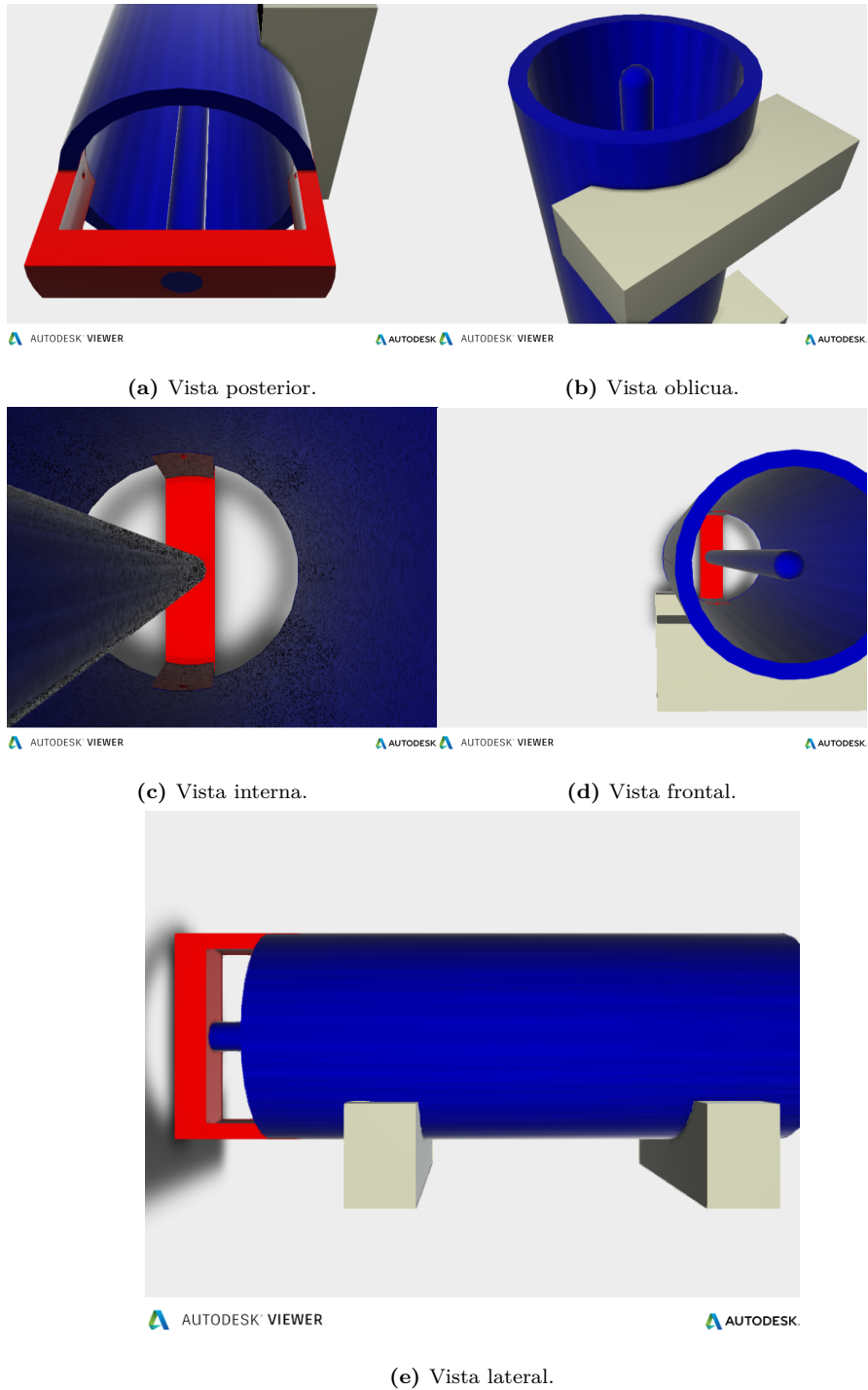


Figura 3.2: Diferentes perspectivas del modelo tridimensional. Los colores son indicativos de diferentes materiales; azul corresponde al acero inoxidable, rojo al teflón aislante y el beige es madera. En un inicio este era el prototipo, sin embargo, la montura de teflón afectaba significativamente el flujo de aire, por lo cual el diseño se cambió al de la Fig. 3.1.

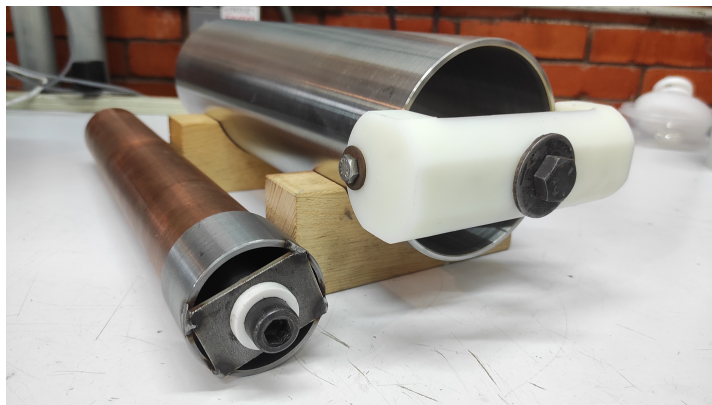
3. MATERIALES Y MÉTODOS

Tabla 3.1: Parámetros del diseño del condensador de Gerdien. Todas las medidas están dadas en metros.

Largo	R_2	R_1	Material	Capacitancia	Aislante
0.33	0.052	0.009	Acero	0.2 nF	Teflón



(a) Vista anterior.



(b) Vista posterior.

Figura 3.3: Diferentes perspectivas de los Gerdien reales. Para este estudio, optamos por usar el modelo de mayor tamaño. Como ya se ha mencionado, al final nos deshicimos de la sección blanca que corresponde al teflón.

3.2. Caracterización de los componentes y ensamblaje del experimento

En la Fig. 3.11, mostramos el conjunto completo del experimento, esto es, el circuito general compuesto por las fuentes de poder, amperímetro, cañón de iones, ventilador, el Gerdien y el sistema de cómputo. La malla ciclónica de metal galvanizado tiene el propósito de formar una jaula de Faraday alrededor del Gerdien. Lo anterior evita la producción de fuerza electromotriz (FEM) debido a la inducción electromagnética que las ondas/señales de radiocomunicación ejercen sobre el circuito completo. Sin esta malla es imposible medir fielmente con este nivel de sensibilidad en la corriente.

A lo largo de las siguientes secciones iremos abordando las componentes de forma individual.

3.2.1. Fuentes de poder y modificaciones a un ionizador comercial

Para la generación de iones por efecto corona, adquirimos un dispositivo comercial muy sencillo que utiliza el alto voltaje de salida y filamentos de fibra de carbono para ionizar el aire y producir NAI (Fig. 3.4). Lo modificamos para adherirlo a una fuente de voltaje continua (de ahora en adelante la llamaremos fuente de voltaje de aceleración), con la finalidad y ganancia de poder variar este parámetro desde los 0 a los 8,400 V (Fig. 3.5), para ambas polaridades, negativa y positiva, lo cual se traduce en producción de aniones y cationes, respectivamente. Antes de la modificación, tanto la diferencia de potencial como la polaridad negativa venían invariables de fábrica. Logramos una eficiencia de densidad de carga ocho órdenes de magnitud mayor que la reportada por el fabricante, como se verá en el siguiente capítulo.

Además de la fuente de voltaje que alimenta el cañón de iones ya mencionada, existen las fuentes que polarizan los electrodos, las cuales realizan el barrido de potencial eléctrico de colección de carga dentro del Gerdien. Utilizamos otro par construidas por el Técnico Académico del ICF, el Ing. Armando Bustos, una para cada polaridad, capaces de recorrer desde los 0 a los 5,140 V (Fig. 3.6). Estas fuentes son sumamente útiles porque facilitan la automatización de la medida, a través de ajustar el potencial mediante un voltaje de control externo gobernado por el software LabVIEW.

3. MATERIALES Y MÉTODOS



Figura 3.4: Se muestra el ionizador DF-FA8000D original capaz de proveer 1×10^8 iones negativos según declara el fabricante (cuando conectada a un tomacorriente). Veremos en el capítulo Resultados 4 que después de ser modificado, producirá alrededor de cinco órdenes de magnitud más.



Figura 3.5: Fuente de poder que provee la diferencia de potencial (± 8.4 kV) de alimentación para el cañón de iones. El cable con punta negra es la salida negativa y el rojo, la positiva. El cable enrollado que está por detrás es la conexión a tierra.



Figura 3.6: Fuente de poder que provee la diferencia de potencial de colección entre electrodos (± 5 kV). En este caso, se muestra la de polaridad positiva. Hace el barrido automatizado en el intervalo deseado a través de un voltaje de control externo.

3.2.2. Calibración del picoamperímetro

Con la finalidad de recolectar la corriente de las cargas en movimiento impactadas en los electrodos, utilizamos el picoamperímetro modelo 485 de la marca Keithley (Fig. 3.7), que opera como un amperímetro de retroalimentación (transimpedancia) con capacidades básicas de registro y comunicación. Este dispositivo es capaz de medir corriente directa en siete rangos decádicos, desde 100 fA hasta 2 mA, con una sensibilidad inicial de 100 fA y un voltaje de carga máximo de 200 μ V. También cuenta con salida analógica y capacidades de lectura logarítmica.

Para verificar la precisión del picoamperímetro Keithley 485, diseñamos un circuito divisor de voltaje que incluye dos potenciómetros ajustables y un conjunto de resistencias fijas. Este circuito se diseñó para transformar 3 V procedentes de las pilas, en corrientes del orden de decenas de nA, como se ilustra en la Fig. 3.8a. Utilizamos simulaciones mediante Simulink (3.8b), una plataforma de MATLAB, para modelar el comportamiento del circuito y comparar los resultados simulados con los medidos experimentalmente. Simulink permite la modelización de sistemas dinámicos a través de diagramas de bloques, lo cual es ideal para representar sistemas físicos y electrónicos como el descrito.

El circuito incluye potenciómetros que permiten un ajuste fino de las resistencias, modificando así la relación de voltajes y afectando directamente la corriente a través del circuito. Al incrementar la resistencia en uno de los potenciómetros, el voltaje a lo largo de este componente disminuye, lo cual reduce la corriente total que fluye a través

3. MATERIALES Y MÉTODOS



Figura 3.7: El picoamperímetro Keithley 485, un instrumento de medición de corrientes muy bajas, esencial para detectar corrientes en el rango de 100 fA (0.1 pA).

del sistema debido a la mayor resistencia impuesta. A la inversa, disminuir la resistencia aumenta el voltaje en el nodo y, por consiguiente, la corriente total.

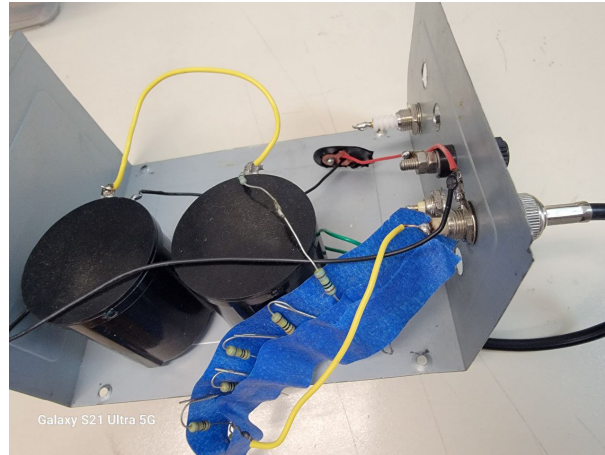
Estas variaciones son cruciales para calibrar correctamente el picoamperímetro, ya que permiten verificar la exactitud del dispositivo dentro de su rango de operación especificado. La configuración experimental y los ajustes realizados se validaron comparando los datos medidos con los modelos teóricos y simulados, ajustados por un modelo lineal para proporcionar una base de comparación precisa (Fig. 3.8c).

Nuestros resultados indican que el picoamperímetro Keithley 485 opera dentro del rango de precisión deseado para bajas corrientes, y no se requirió calibración adicional. Este análisis detallado asegura que el instrumento es fiable para nuestras aplicaciones de medición de corrientes pequeñas.

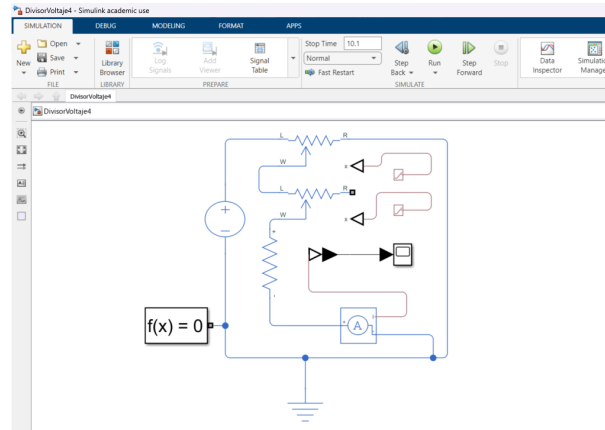
3.2.3. Sistema computacional de control automatizado mediante LabVIEW

Describo los fundamentos detrás del sistema computacional de control automatizado de la medición mediante LabVIEW. Este software es un lenguaje de programación gráfico y un entorno de desarrollo para la creación de sistemas de medición, control y prueba. Fue desarrollado por National Instruments y se utiliza en una amplia variedad de aplicaciones, desde la investigación científica hasta el control de procesos industriales. LabVIEW permite a los usuarios crear programas mediante el uso de bloques gráficos en lugar de escribir código, lo que lo hace accesible para aquellos que no tienen

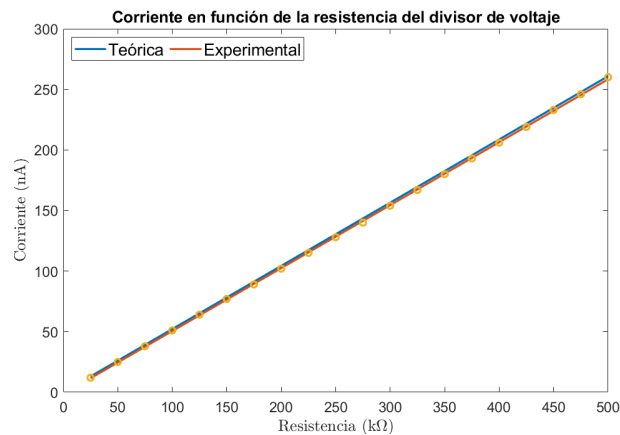
3.2 Caracterización de los componentes y ensamblaje del experimento



(a) Divisor de voltaje ajustable con dos potenciómetros de hasta $0.5\text{ G}\Omega$ y 11 resistencias en serie de $1\text{ G}\Omega$ cada una, configurado para probar la precisión del picoamperímetro Keithley.



(b) Diagrama simplificado del circuito realizado en Simulink, mostrando el diseño de bloques utilizado para simular el comportamiento del divisor de voltaje.



(c) Comparación entre la curva teórica y los datos experimentales, mostrando una discrepancia máxima del 2%.

Figura 3.8: Se muestran el esquema simplificado del circuito además de su implementación experimental. También la gráfica que compara los cálculos teóricos como las mediciones experimentales.

3. MATERIALES Y MÉTODOS

experiencia en programación. Este software de ingeniería de sistemas permite la integración de hardware y software para realizar pruebas, medidas y control. Una de las características más importantes es su capacidad para controlar y manipular hardware a través de su entorno de programación gráfica. En este caso específico, a través de las tarjetas tipo DAQ (*data acquisition* adquisición de datos, por sus siglas en inglés), en este caso a través de una PCI (*Peripheral Component Interconnect* interconexión de componentes periféricos, por sus siglas en inglés), que son componentes de hardware que se conectan a la placa base del ordenador, LabVIEW puede controlar una fuente de poder de voltaje ya que esta envía señales de 0 a 9 V a las fuente de poder, donde los ceros se corresponden y a su vez, 9 V corresponde a 5,140 V.

En la Fig. 3.9 se muestra la interfaz gráfica que desarrollé. La Fig. 3.10 las conexiones de la computadora, a la PCI, al módulo de interfaz analógica que manda los voltajes de control a las fuentes de voltaje de colección y además recibe los datos de la corriente provistos por el picoamperímetro.

El programa inicia el barrido de diferencia de potencial entre cilindros y al mismo tiempo recibe las medidas de corriente del picoamperímetro, las cuales escribe en un archivo para su posterior análisis. Cabe destacar que también grafica en tiempo real.

La ecuación que nos permite controlar hasta qué diferencia de potencial entre cilindros terminamos el barrido (U_f) y a qué tasa de “velocidad” ($\frac{V}{s}$) implementada en el programa es la siguiente

$$U_f = \frac{5140 N}{9 i}, \quad (3.1)$$

donde N es el número de bucles (*loops*) que el usuario designa al programa, cada ciclo equivale a un segundo, por lo que también se le podría representar con la letra t . Se dejó explícita la fracción entre escalares porque el voltaje de control para las fuentes que polarizan los cilindros es de 9 V, sin embargo, estas tienen una capacidad máxima de 5,140 V, por lo cual estamos normalizando. i es el factor de proporción que define la tasa de velocidad de barrido.

Es de libre elección el número de muestras por segundo que se quiera recabar, p. ej., designar 1,000 Hz por cada iteración de un segundo nos devuelve 1000 mediciones.

3.2.4. Flujo de viento, temperatura y humedad

El viento fue generado mediante un ventilador de computadora genérico, 12 V de voltaje nominal de corriente continua, $90 \times 90 \times 25$ mm y 7 aspas. En la Tabla 3.2 y en la Fig. 3.12 se presentan los voltajes suministrados al ventilador y la velocidad correspondiente a estos, escogimos como parámetros representativos los casos $9 \text{ V} \leftrightarrow 3 \text{ ms}^{-1}$ y

3.2 Caracterización de los componentes y ensamble del experimento

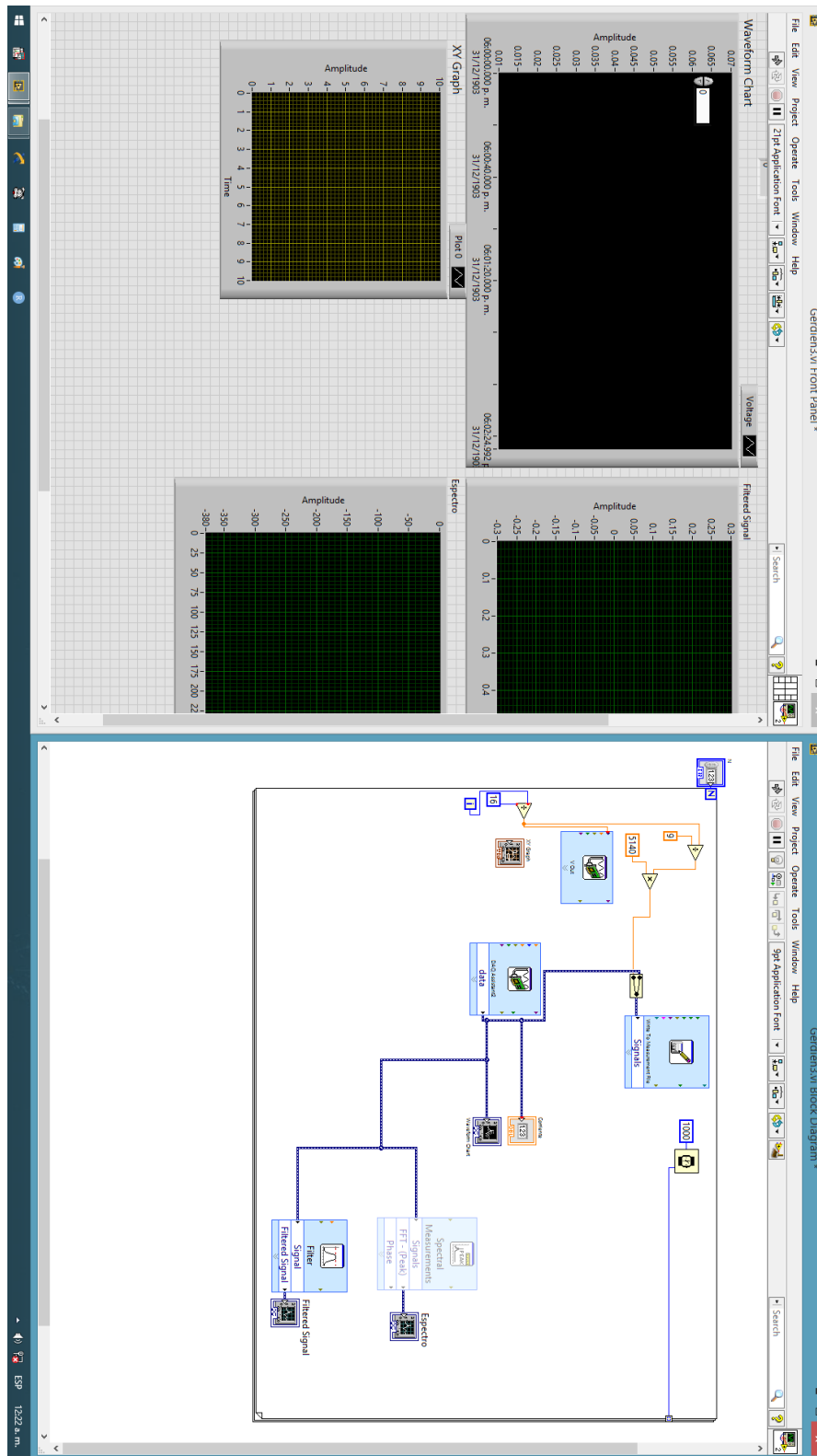


Figura 3.9: Programa gráfico de LabVIEW.

3. MATERIALES Y MÉTODOS



Figura 3.10: Se presenta la parte posterior del ordenador que tiene instalado el LabVIEW. Se puede observar a la caja blanca en la parte superior, donde se encuentra el módulo de adquisición de datos DAQ.

$18\text{ V} \leftrightarrow 6\text{ ms}^{-1}$. Y por supuesto el caso trivial, nulo voltaje, nulo flujo de viento. Ahora bien, dado que el flujo de viento (caudal o gasto) se puede calcular como $Q = uA$ donde u es la velocidad de aire y A es el área transversal, en este caso del cilindro mayor ($r = 0.052\text{ m}$), y así presentamos esta variable en la tercera columna (en litros sobre segundo).

Para medir la velocidad del viento, utilizamos el anemómetro de flujo de aire GM8902 de la marca Benetech (Fig. 3.13a), un instrumento diseñado específicamente para estas mediciones. Este dispositivo ofrece la capacidad de medir la velocidad del viento, la temperatura y el flujo de aire. El anemómetro permite registrar el valor máximo y mínimo de la velocidad del viento, así como calcular la velocidad promedio. En cuanto a la temperatura y humedad, ocupamos el medidor Fluke 971 (Fig. 3.13b), diseñado para proporcionar mediciones precisas y confiables. Este dispositivo es esencial para evaluar las condiciones ambientales durante nuestras mediciones.

A continuación, se detallan algunas de las normas de seguridad que se siguieron durante los experimentos:

1. No se midió sin la supervisión de algún otro miembro del laboratorio o el responsable de éste.
2. La malla exterior no solo fungió como jaula de Faraday y aislante al ruido electromagnético (FEM), sino que, al encontrarse aterrizada, también servía de pro-

3.2 Caracterización de los componentes y ensamblaje del experimento

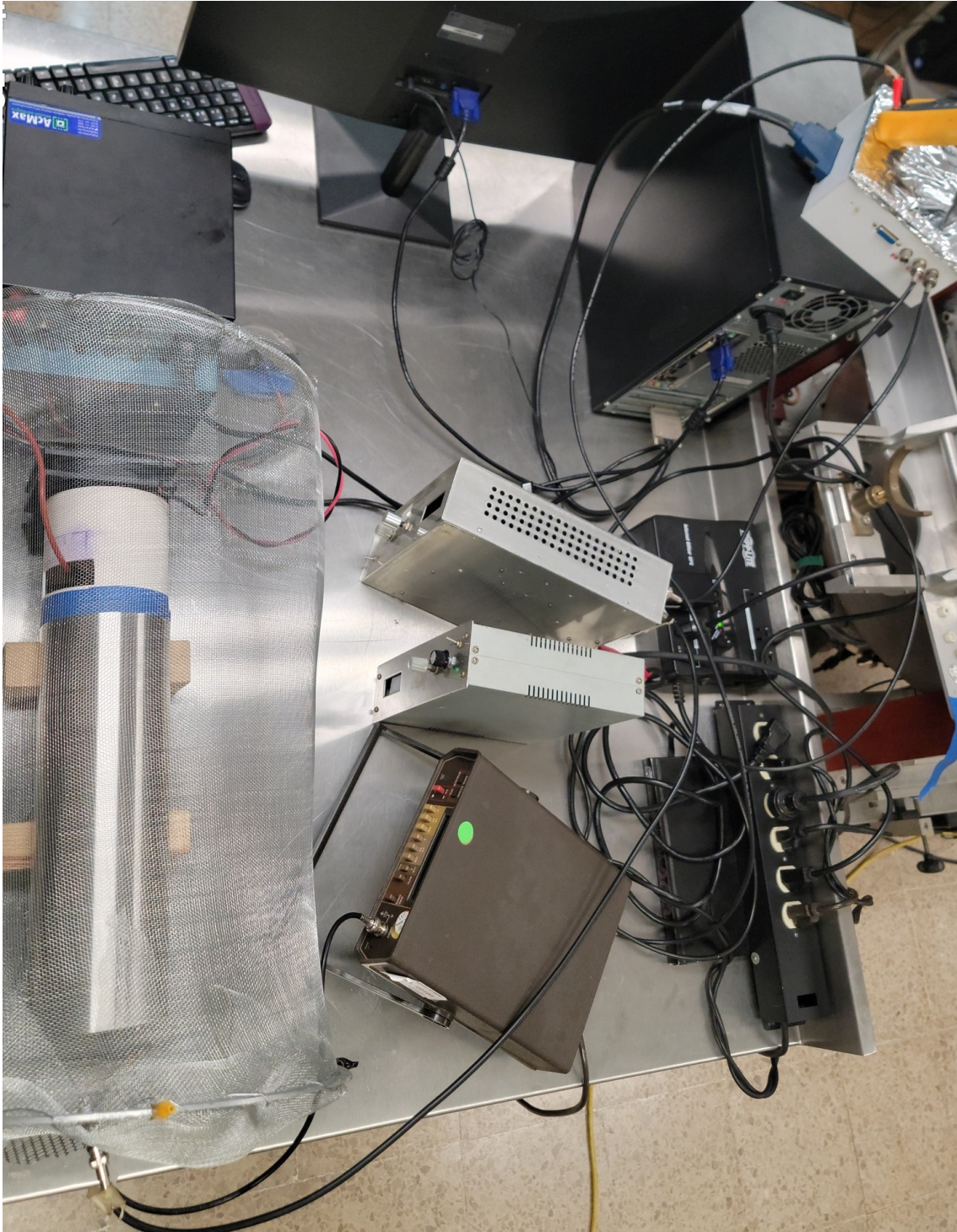


Figura 3.11: Se muestra el ensamblaje general del experimento.

3. MATERIALES Y MÉTODOS

Tabla 3.2: Equivalencia entre voltaje suministrado al ventilador y la velocidad de viento generada (ver Fig. 3.12).

Voltaje suministrado (V)	Velocidad de viento (m/s)	Flujo de viento (Lt/s)
4	1.1	9.3
5	1.5	12.7
6	1.8	15.3
7	2.2	18.7
8	2.6	22.1
9	3	25.5
10	3.2	27.2
11	3.6	30.6
12	4.1	34.8
13	4.4	37.4
14	4.6	39.1
15	4.9	41.6
16	5.4	45.9
17	5.7	48.4
18	6	51.0

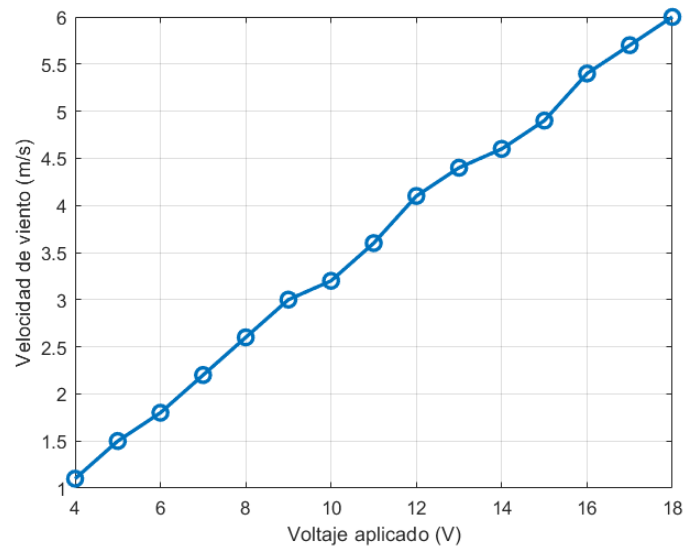


Figura 3.12: Gráfica sobre la correspondencia entre el voltaje aplicado al ventilador y la velocidad de viento resultante (ver Tabla 3.2). Nótese el comportamiento lineal.

3.2 Caracterización de los componentes y ensamblaje del experimento



(a) Anemómetro GM8902 se utilizó para medir la velocidad del viento, con la cual es posible calcular el flujo.



(b) El medidor Fluke 971 se utilizó para medir y monitorear la humedad y la temperatura.

Figura 3.13: Instrumentos para la medición de parámetros ambientales y la velocidad de viento.

3. MATERIALES Y MÉTODOS

tección a los electrodos e ionizador ante el peligro de altos voltajes.

3. Todas las fuentes de poder fueron puestas a 0V y apagadas por completo antes de manipular cualquier componente de la configuración dentro de la malla.
4. Se ocuparon dos extractores de aire en caso de estar generando ozono irritante.
5. Guantes y lentes protectores se utilizaron en el uso de acetona, alcohol (para la limpieza de los componentes) o la manipulación de alambres.

Capítulo 4

Análisis de Resultados

En esta tesis se realizaron mediciones bajo diferentes condiciones para estudiar el comportamiento de los iones producidos por ionizadores comerciales. Estos ionizadores consisten en fibras de carbono y el proceso de producción de los iones es, en principio, por efecto corona. En la Tabla 4.1 presento los intervalos de operación para los diferentes parámetros de medición. Cabe aclarar que, en cuanto a las filas correspondientes a diferencias de potencial, ya sean de ionización o colección, podemos optar por polaridad negativa o positiva. La última fila se refiere a qué tasa de volts por segundo podemos programar la toma de mediciones automática según la ecuación integrada en LabVIEW Ec. 3.1. En la Fig. 3.12 tenemos la recta de correspondencia entre voltajes aplicados al ventilador y la velocidad de viento, que se presenta en la tercera fila. En adelante, en aras de coadyuvar a la simplicidad del texto, los términos “diferencia de potencial” y “voltaje” se usarán de forma indistinta.

Tabla 4.1: Tabla de parámetros con sus respectivos intervalos de operación en sistemas de ionización.

Parámetros	Intervalo de Operación	Valores típicos
Altos voltajes de ionización	0 a ± 8 kV	4,5,6,7 y 8 kV
		2, 2.2, 2.4,..., 3.8 kV
Voltaje de colección	0 a $\pm 5,140$ V	0 a $\pm 2,800$ V
Velocidad de viento	0 a 6 ms^{-1}	0, 3 y 6 ms^{-1}
Tasa de velocidad	0 a $\pm 570 \text{ Vs}^{-1}$	± 1 a $\pm 11 \text{ Vs}^{-1}$

Con el propósito de diferenciar y clasificar los intervalos de estudio en esta tesis, hemos establecido una categorización específica. Dentro de la sección identificada como de

“muy altos voltajes”, hemos realizado mediciones utilizando cinco diferentes magnitudes de voltaje absoluto: 4, 5, 6, 7 y 8 kV para ambas polaridades iónicas. Además, estas mediciones se llevaron a cabo a tres distintas velocidades de viento. En paralelo, hemos definido una sección de “altos voltajes intermedios” donde se llevaron a cabo mediciones en once niveles de voltaje distintos: 2, 2.2, 2.4, hasta 3.6 y 3.8 kV. Se eligieron estos valores en incrementos de 200 V, acercándonos al límite inferior de nuestra capacidad de medición, es decir, por debajo de los 2 kV. En consecuencia, no fue posible medir iones naturales, o equivalentemente, señales de iones que corresponden al potencial cero en el ionizador. La magnitud máxima de la diferencia de potencial de colección (ambas polaridades) entre cilindros fue escogida de tal manera que, como mínimo, se vieran reflejados tanto la zona lineal de Ohm, como la zona de saturación (Fig. 2.5). Inclusive, en algunos casos se midió hasta que hubo una pendiente negativa después de la zona de saturación.

Por lo anteriormente descrito, vemos que contamos con dos polaridades para cada diferencia de potencial, cinco voltajes de ionización, tres velocidades de viento, lo representa sesenta tipos de medidas diferentes. Por dar un ejemplo, pudimos medir a -7 kV de voltaje de ionización, a 3 ms^{-1} de velocidad de viento y una diferencia de potencial de colección entre cilindros positiva. Si esta fuere negativa en vez de positiva, entonces estaríamos hablando de otro tipo de medición, con una estructura en las curvas características muy diferente, como se verá más adelante. En el régimen de altos voltajes intermedios, únicamente medimos con la misma polaridad entre voltaje de ionización y el voltaje colector a diferencia de los muy altos voltajes. Cada medida requirió por lo menos dos tomas de datos para asegurarnos sobre la reproducibilidad de los datos.

4.1. Interpretación de curvas características Voltaje contra Corriente

4.1.1. Experimentos de control, pruebas básicas de validación y de reproducibilidad

La estructura característica de las curvas de saturación no podría existir sin la presencia de aire o una diferencia de potencial de colección (ver capítulo 2). Efectivamente, al medir en ausencia de un voltaje de colección, con flujo de viento y voltaje de ionización constantes, observamos una recta horizontal constante en la medición de corriente. En las Figs. 4.1 y 4.2 mostramos el caso donde no hay flujo de aire, pero sí diferencia de potencial entre cilindros. Declaramos que no existe la forma de la curva como la teorizada en el capítulo de conceptos, a excepción de las curvas correspondientes a ± 7 y ± 8 kV, cuya configuración vamos a discutir más adelante en el apartado de análisis de este capítulo.

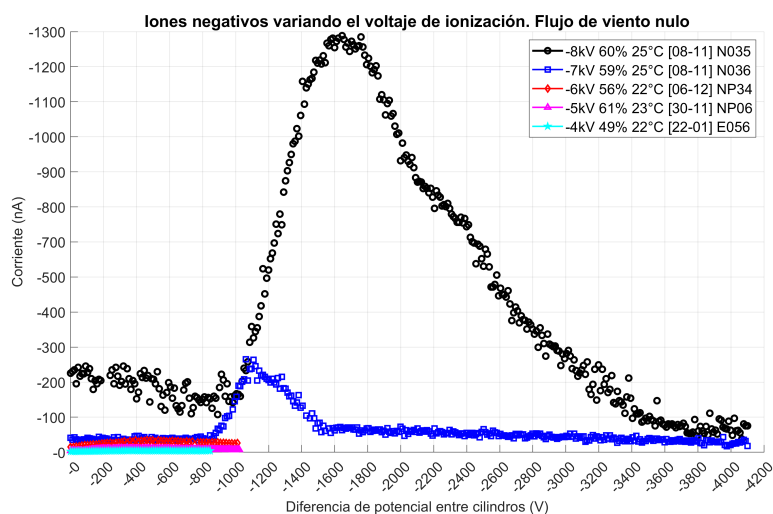


Figura 4.1: Iones negativos producidos por efecto corona para muy altos voltajes sin velocidad de viento. Medidas realizadas el mismo día.

En general y como una primera aproximación al análisis de datos, mediante una serie de figuras, vamos a justificar las observaciones sobre las siguientes tendencias más inmediatas: a mayor velocidad de flujo de aire, mayor es la carga recolectada. A su vez, a mayor voltaje de ionización, mayor es la cantidad de corriente medida (Figs. 4.6 y 4.10) conforme a la Ec. (3.1).

Todas las curvas en las gráficas contendrán en la leyenda, en el siguiente orden: la velocidad de flujo de viento correspondiente a la que se midió, los parámetros temperatura y humedad relativa, (dentro de corchetes) el día y mes en que se realizó y, por último, cuatro dígitos cuya función es simplemente mantener un control interno con las etiquetas que le asignamos a cada medición. El ionizador siempre se encontró a una distancia de 5 cm del cilindro interior del Gerdien. En el caso donde existan varias curvas en una gráfica con diferentes voltajes de ionización (Figs. 4.1, 4.2, 4.6 y 4.10), este dato vendrá al principio de todos los anteriormente mencionados. En aras de presentar los datos de la manera más fidedigna posible, además de facilitar la comprensión por parte del lector, en los casos donde se consideró necesario, algunas gráficas se presentarán tanto en escala lineal como logarítmica, ya que la primera permite comparar las mediciones experimentales con la teoría y la segunda, facilita la comparación de varias curvas que difieren en magnitud de manera significativa.

Las Figs. 4.3, 4.4 y 4.5 ilustran la reproducibilidad de los experimentos, donde las primeras dos muestran resultados bajo condiciones atmosféricas comparables, y la

4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

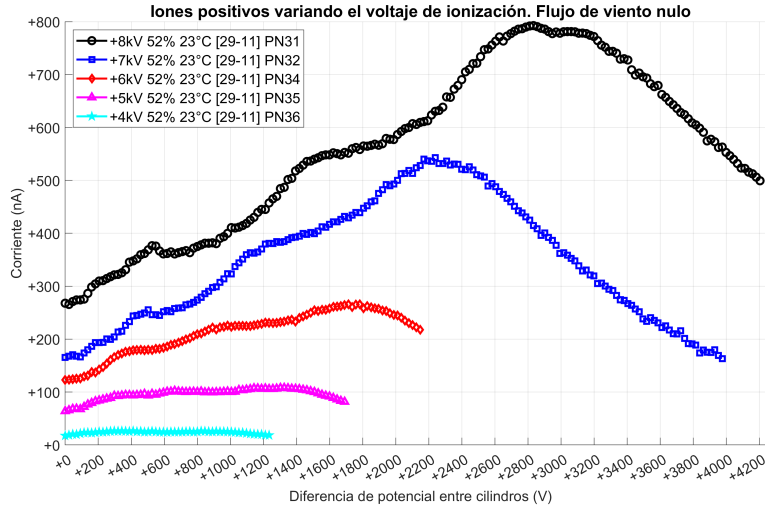


Figura 4.2: Iones positivos producidos por efecto corona para muy altos voltajes sin velocidad de viento. Medidas realizadas el mismo día.

tercera bajo condiciones atmosféricas considerablemente distintas. En la Fig. 4.5, las medidas bajo mismos parámetros difieren significativamente, tanto en magnitud como estructura, debido a la diferencia de humedad, la mayor registrada en esta tesis. Sin embargo, esta variabilidad no va más allá de un orden de magnitud. Según nuestro conocimiento actual y limitaciones de la técnica, la única variación notable, aparte de la posible acumulación de polvo, corresponde a las diferencias en la humedad ambiental. En el caso de la Fig. 4.4, la toma de datos se llevó a cabo hasta la máxima diferencia de potencial disponible de +5 kV, donde notamos que la corriente decae por debajo de la corriente inicial en 0 V.

4.1.2. Curvas de iones negativos producidos por efecto corona

En la Fig. 4.6 podemos notar que, a mayor magnitud de voltaje de ionización, mayor es la corriente medida, alcanzando una corriente de hasta casi $-3\mu\text{A}$. La misma tendencia se sigue con respecto a la velocidad de viento. Para las Figs. 4.3 y 4.7 fue posible observar una especie de estructura sin la necesidad de un flujo de viento. Atribuimos esto a la diferencia de potencial de ionización, que, para efectos prácticos, termina funcionando como un voltaje de aceleración y provoca viento iónico (sección 2.5).

Para la Fig. 4.6 las medidas fueron tomadas el mismo día (15 de noviembre de 2023 a excepción de -5 kV), una tras de otra, a una tasa de cambio en el barrido de potencial entre cilindros de -11.4 Vs^{-1} , la cual es rápida y permitió la realización del conjunto

4.1 Interpretación de curvas características Voltaje contra Corriente

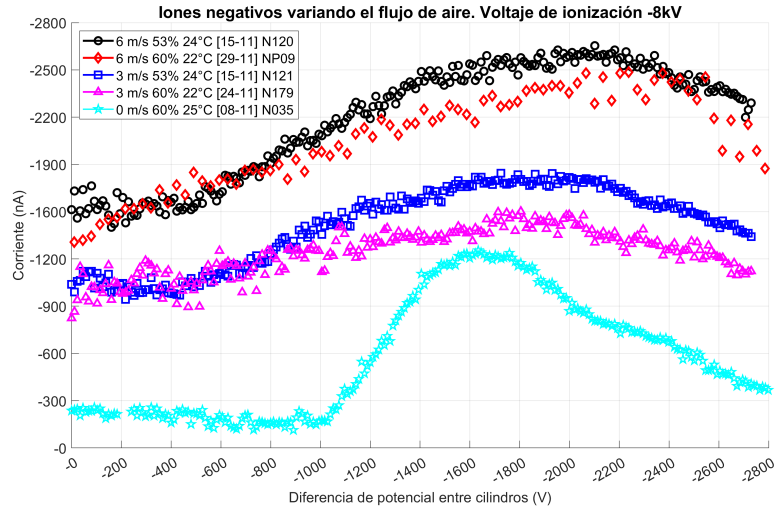


Figura 4.3: Representación gráfica de la corriente generada por iones negativos producidos por efecto corona, a -8 kV para varios flujos de viento. La toma de datos se realizó en el mismo mes de noviembre de 2023, separadas por una cantidad significativa de días para probar la reproducibilidad.

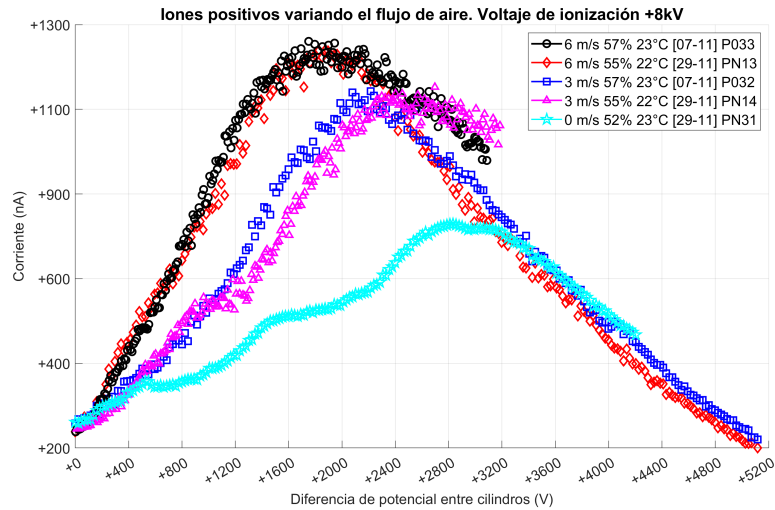


Figura 4.4: Representación gráfica de la corriente generada por iones positivos producidos por efecto corona, a $+8\text{ kV}$ para varios flujos de viento. La toma de datos se realizó en el mismo mes de noviembre de 2023, separadas por una cantidad significativa de días para probar la reproducibilidad.

4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

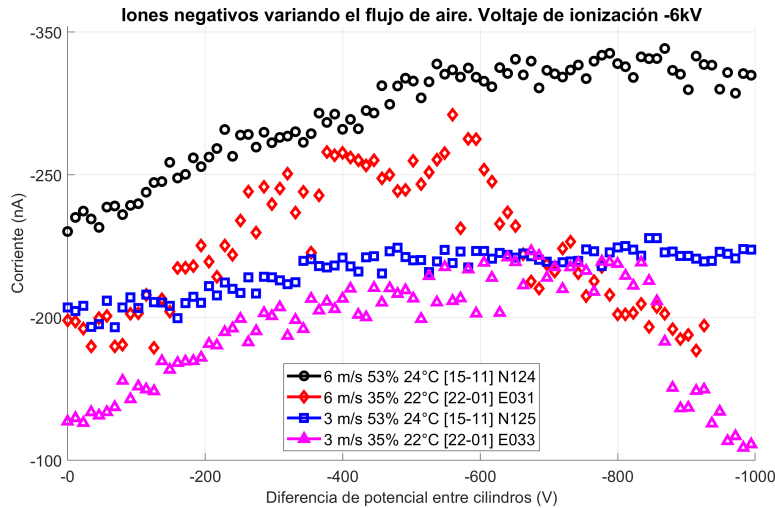


Figura 4.5: Representación gráfica de la corriente generada por iones negativos producidos por efecto corona, a -6 kV para varios flujos de viento y porcentajes de humedad. La toma de datos se realizó en conjuntos separados por meses con el fin de probar la reproducibilidad.

de mediciones sin que hubiera variación de la temperatura y la humedad. Para -8 y -7 kV, se midió en la escala de $2 \mu\text{A}$ del multímetro, a diferencia de 200 nA para 6 y -5 kV.

Presentamos, únicamente para esta ocasión (altos voltajes intermedios), a las Figs. 4.9a y 4.9b como puntos que representan un promedio por intervalos, debido a que el diagrama de dispersión original (no presentado) conglera los datos recabados en conjuntos de líneas horizontales, lo que sugiere la formación de intervalos discretos en la medición. Esta característica se debe a la sensibilidad y resolución del dispositivo Keithley 485, y es especialmente relevante al medir corrientes muy bajas, tales como -0.05 nA o menores, donde cualquier fuente de ruido o interferencia puede afectar significativamente las lecturas. En este contexto, la resolución del dispositivo de medición es de crucial importancia.

La formación de líneas horizontales en el gráfico podría atribuirse a varios factores, como que el convertidor analógico-digital del dispositivo de medición tiene una resolución cercana a la magnitud de la señal que se intenta medir (en este caso, una sensibilidad de 0.1 pA para una magnitud de señal de aproximadamente 50 pA), el ruido de cuantificación podría causar que los datos se agrupen en escalones discretos, en que la resolución del dispositivo podría ser demasiado baja para capturar las pequeñas variaciones en la corriente, lo que conduce a puntos de datos que aparecen en intervalos fijos. Lo anterior aunado a la gran cantidad de ruido inherente a estas escalas de

4.1 Interpretación de curvas características Voltaje contra Corriente

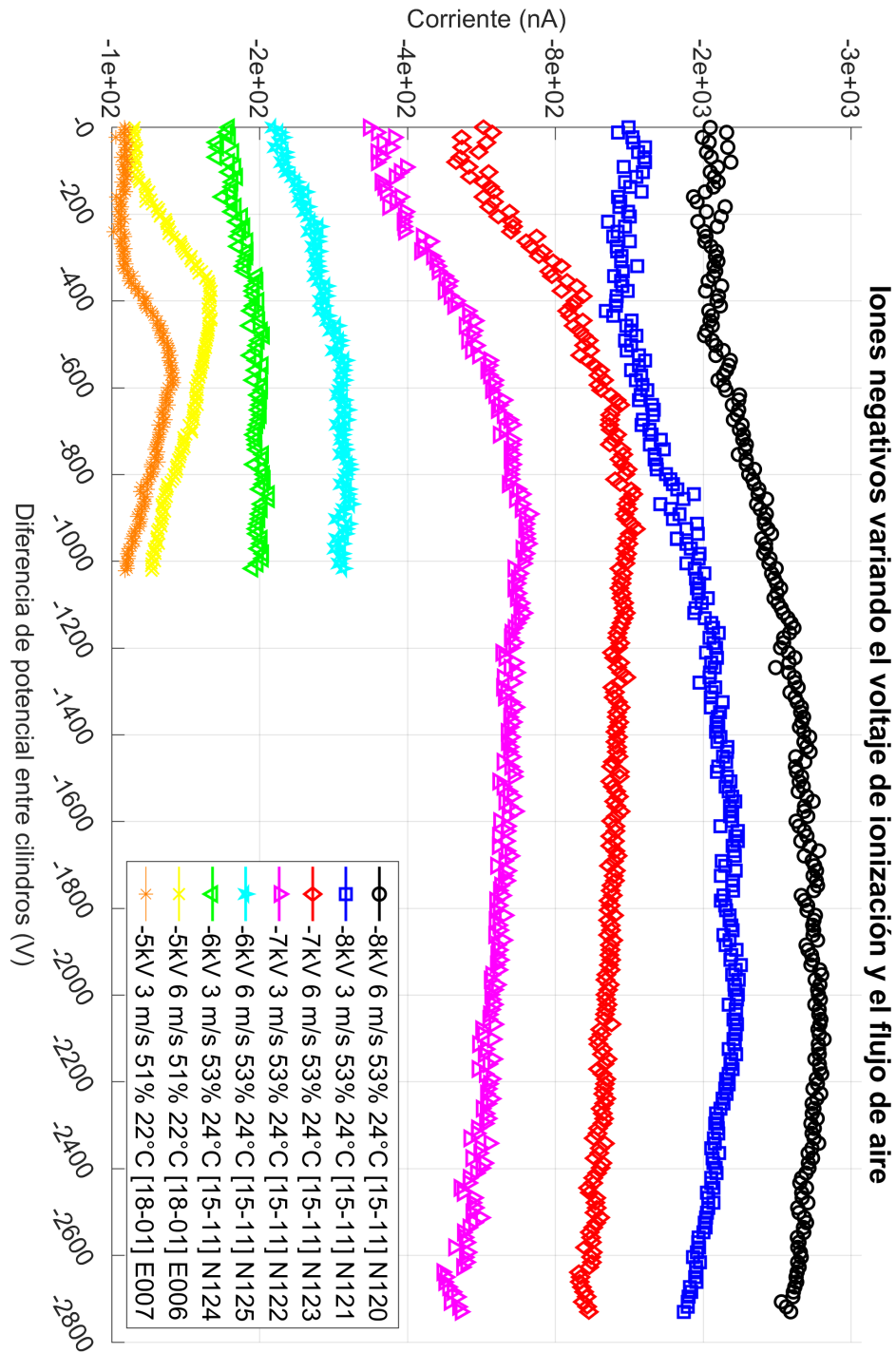


Figura 4.6: Representación gráfica en escala logarítmica de la corriente generada por iones negativos producidos por efecto corona, correspondientes a los voltajes de ionización de mayor magnitud utilizados en esta investigación, con variaciones en los flujos de viento.

4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

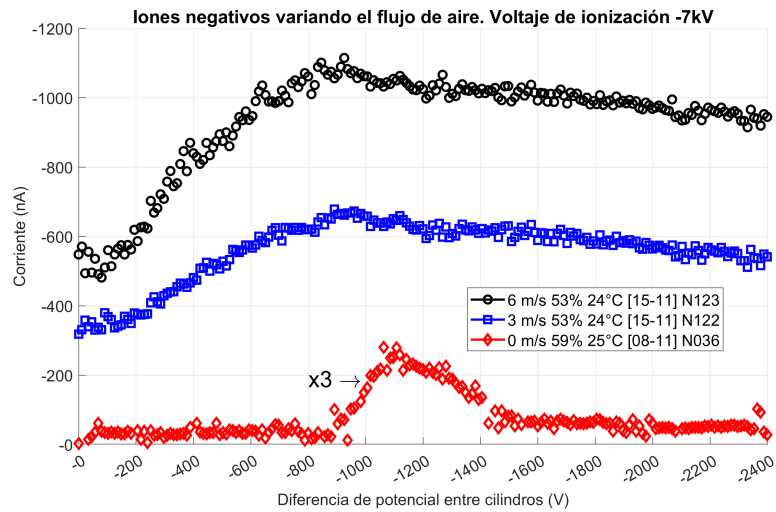


Figura 4.7: Representación gráfica de la corriente generada por iones negativos producidos por efecto corona, a -7kV para varios flujos de viento. En la presente instancia, se ha ajustado la escala de la curva correspondiente al flujo de viento nulo, simbolizada mediante rombos rojos, mediante la aplicación de un factor multiplicativo de tres para facilitar su visualización.

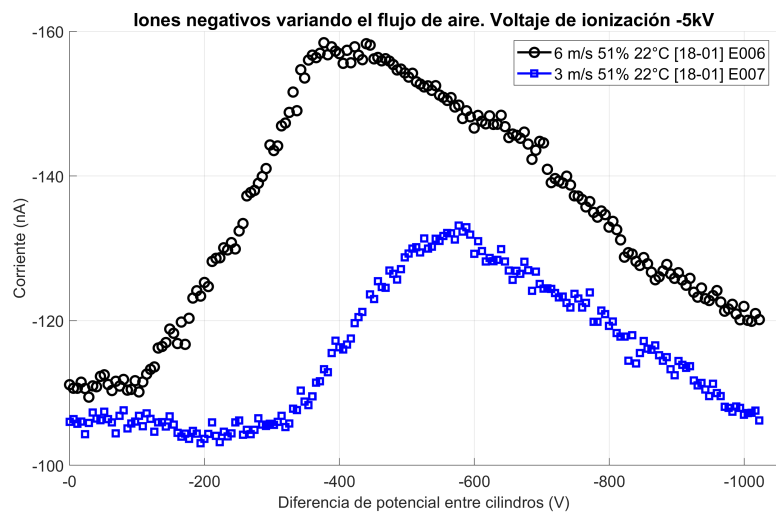
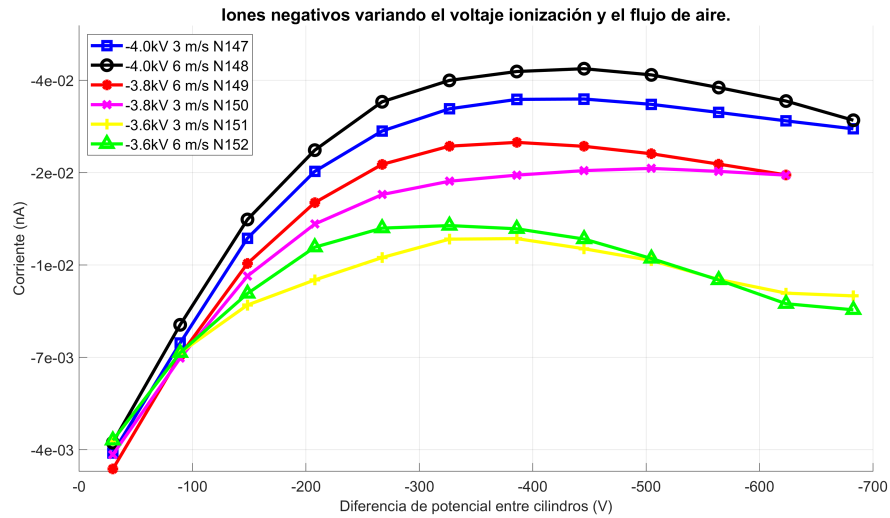
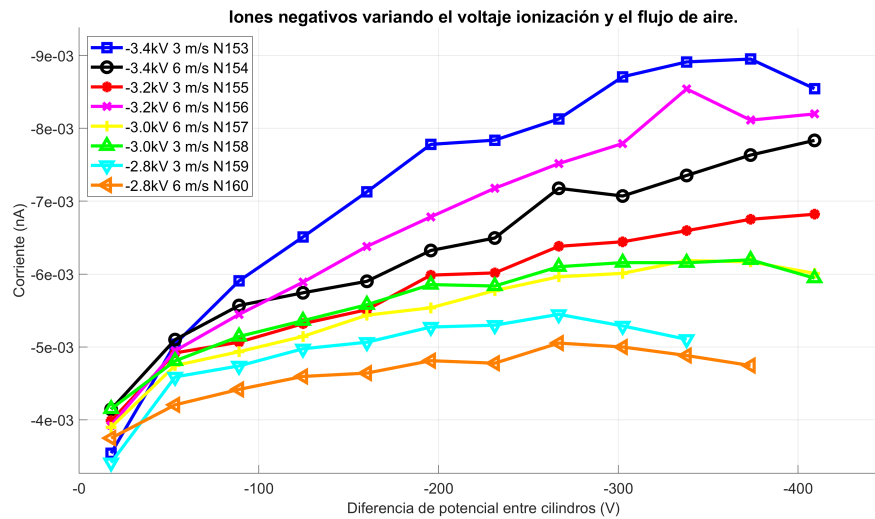


Figura 4.8: Representación gráfica de la corriente generada por iones negativos producidos por efecto corona, a -5kV para varios flujos de viento. No fue posible detectar estructura para flujo de viento nulo.

4.1 Interpretación de curvas características Voltaje contra Corriente



(a) Barrido del potencial de -4 kV a -3.6 kV en pasos de 200 V , escala logarítmica.



(b) Barrido del potencial de -3.4 kV a -2.8 kV en pasos de 200 V , escala lineal.

Figura 4.9: Iones negativos producidos por efecto corona para altos voltajes intermedios, esto es, -4 kV o menos, promediados en intervalos de 60 V . Las medidas se realizaron el mismo día (22 de noviembre de 2023), una tras de otra, lo que logró un cambio mínimo de la humedad relativa y temperatura, donde todas se encuentran entre $59\% - 61\%$ y 22°C ; en el escala 2 nA del picoamperímetro con flujo entre 9 ó 18 V en el ventilador, lo que significa una velocidad de 3 y 6 ms^{-1} respectivamente.

4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

sensibilidad en la corriente, lo que nos llevó a tomar 1000 muestras por segundo, en un barrido lento (-0.7 Vs^{-1}) de la diferencia de potencial entre cilindros.

Debido a lo anteriormente descrito, es que la Fig. 4.9 haya tenido que procesarse mediante el promedio todos los datos dentro de intervalos de 30 V para la Fig. 4.9b, y 60 V para la Fig. 4.9a. En dichas gráficas no se alcanzan a apreciar las barras de error, ya que este es proporcional a $\frac{1}{\sqrt{N}}$, donde N es el número de puntos de datos en cada intervalo. El cálculo de la magnitud de las barras de error es por lo general de $5 \times 10^{-5} \text{ nA}$, cuando la corriente ronda en $5 \times 10^{-3} \text{ nA}$, es decir, debido al promedio de decenas de miles de muestras, el error es una centésima parte de la medida y no se alcanza a distinguir en la gráfica, se confunde con los símbolos.

4.1.3. Curvas de iones positivos producidos por efecto corona

Esta tesis tiene como objetivo principal, el estudio de iones negativos, como indica su título. Por completez y con tal de contar con una referencia de comparación, también se han estudiado sus contrapartes positivas, sin embargo, no haremos tanto hincapié en estos como con los negativos. Esto es, habrá una menor cantidad de gráficas de iones positivos que de iones negativos.

Para la Fig. 4.10 las medidas se realizaron el mismo día (24 de noviembre de 2023), una tras de otra, a una tasa de cambio en el barrido de potencial entre cilindros de $+11.4 \text{ Vs}^{-1}$, la cual es rápida y permitió la realización del conjunto de mediciones sin que hubiera variación de la temperatura y la humedad. Para +7 y +8 kV, se midió en la escala de 200 nA del picoamperímetro, a diferencia de 20 nA para +5 y +6 kV. Algunas se traslapan durante un gran intervalo de voltajes, v. gr., los triángulos verdes invertidos con las cruces amarillas o los pentagramas cyan con los triángulos magenta. Notamos un máximo de aproximadamente +1,200 nA para iones positivos, menor que su contraparte negativa, la cual llegó a $-2,800 \text{ nA}$ o que es lo mismo, $-2.8 \mu\text{A}$, lo cual indica una relación de aproximadamente 1/2 para la misma distancia del ionizador al Gerdien y aproximadamente misma humedad relativa y temperatura. Los iones positivos menores o iguales a +6 kV parecen presentar dos zonas de saturación, no una única, lo mismo se sigue para +7 y +8 kV cuando el flujo de viento es menor a 6 ms^{-1} .

4.1 Interpretación de curvas características Voltaje contra Corriente

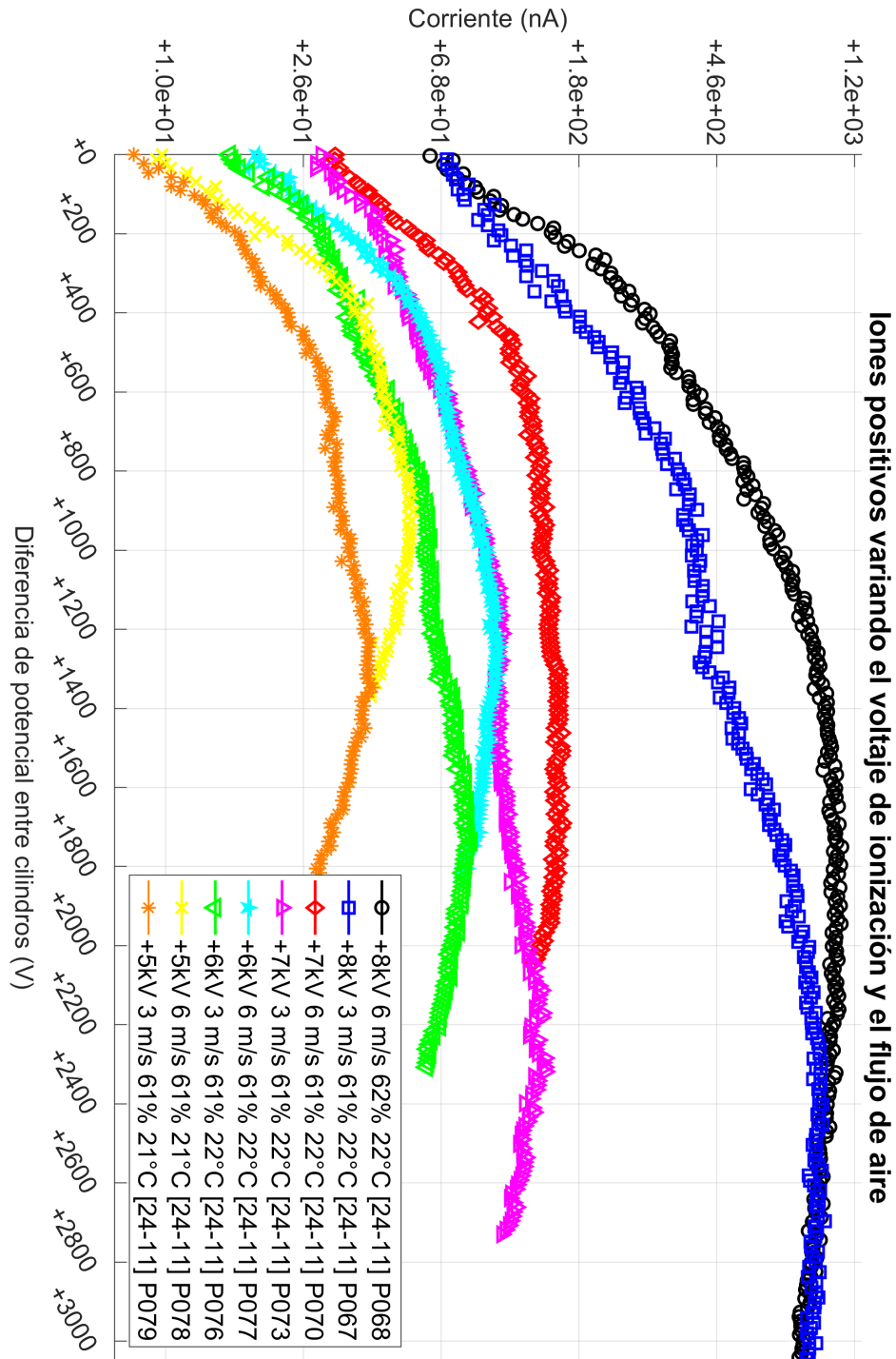


Figura 4.10: Representación gráfica en escala logarítmica de la corriente generada por iones positivos producidos por efecto corona, correspondientes a los voltajes de ionización de mayor magnitud utilizados en esta investigación, con variaciones en los flujos de viento.

4.2. Gráficas de los espectros de Movilidad iónica

4.2.1. Proceso de cálculo y análisis de datos con MATLAB

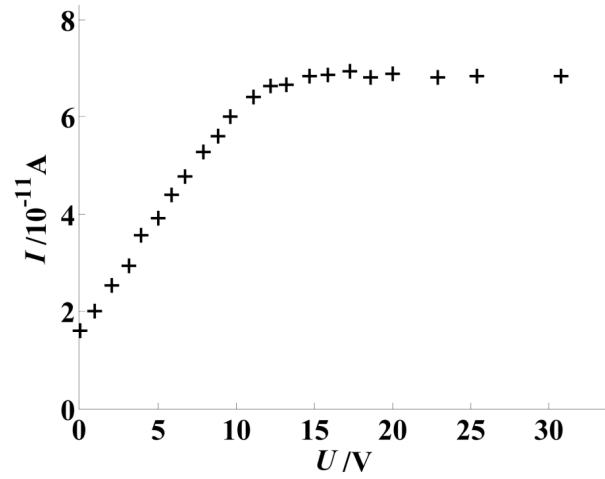
Mediante el código en el Apéndice D.1, realizamos un submuestreo (*downsampling*, por sus siglas en inglés) de la señal para reducir el tiempo de cómputo del espectro de movilidad sin perder la fenomenología subyacente detrás.

Para “calibrar” nuestro código, se utilizó como base los datos del profesor Allen en la referencia [26], misma que la profesora Xiaoqian y colaboradores analizaron en [14], como se muestra en la Fig. 4.11.

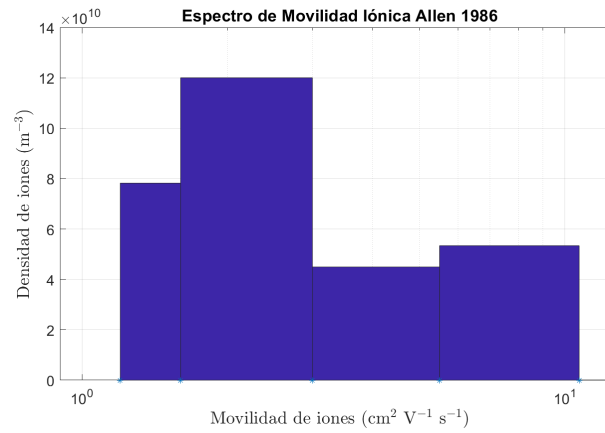
Podemos observar que nuestro código replica fielmente el espectro en cuanto a su estructura e intervalos de movilidad, esto debido a que calculamos un promedio ponderado de movilidad de $1.47 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$ (Ec. (2.24)) y el profesor Allen reporta una movilidad promedio de $1.6 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$, correspondiente al voltaje de saturación, que, acorde con la Ec. (2.25) también implementada en nuestro código, es de 14.5 V , lo cual, mediante una inspección visual, corresponde precisamente con la gráfica 4.11a. Además, Allen reporta una densidad iónica por metro cúbico de $2.9 \times 10^{11} \text{ m}^{-3}$ y nosotros calculamos $3 \times 10^{11} \text{ m}^{-3}$ en la suma de las densidades. Por lo cual concluimos que el código producirá resultados de fiar.

El código presentado en el Apéndice D.2 se emplea para evaluar la densidad iónica en función de la movilidad de los iones. Este proceso comienza con el cálculo de las diferencias entre elementos adyacentes, que están discretizados por intervalos de corriente y voltaje. Se procede al ajuste de curvas, un polinomio de tercer grado a los datos $U - I$, se calcula su primera y segunda derivada, ya que estas nos devuelven criterios para discernir las diferentes secciones de las curvas de forma cuantitativa. En el momento en que la segunda derivada es negativa, podemos hablar de que la sección lineal de Ohm está transitando a la saturación, ya que está formando una concavidad. La primera derivada nos dice en qué punto la función se torna horizontal, esto es, cuando ya hemos llegado a una zona de absoluta saturación. El cálculo de la densidad de iones se hace a través de un bucle para la Ec. (2.23). Obtenida la media ponderada de la movilidad de los iones, se procede a calcular el voltaje de saturación (Ec. (2.25)) para su comparación respecto al método geométrico. Procedemos a la graficación del espectro de movilidad de iones. El código define los bordes de los bins para el histograma, luego realiza la suma de las densidades de iones que caen dentro de cada intervalo de bins y traza el histograma. En la Fig. 4.12 podemos observar un ejemplo del ajuste a los datos recabados para la generación de iones negativos a -8 kV de voltaje de ionización y (6 ms^{-1}) por la Tabla 3.2) 51 Ls^{-1} de flujo de aire.

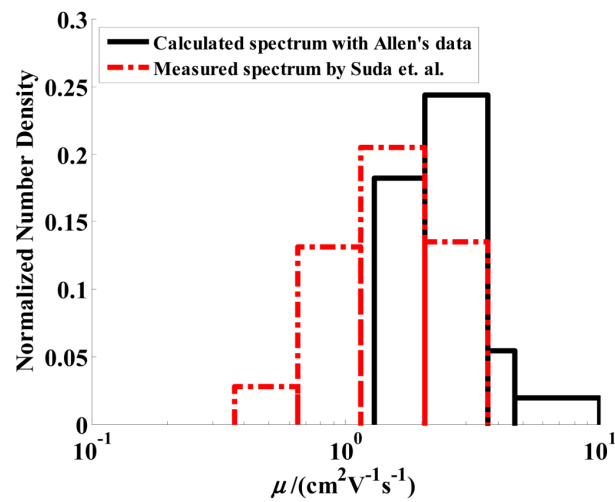
En la Fig. 4.13 presentamos los espectros de movilidad correspondiente a -6 a -8 kV



(a) Datos originales de la referencia [26].



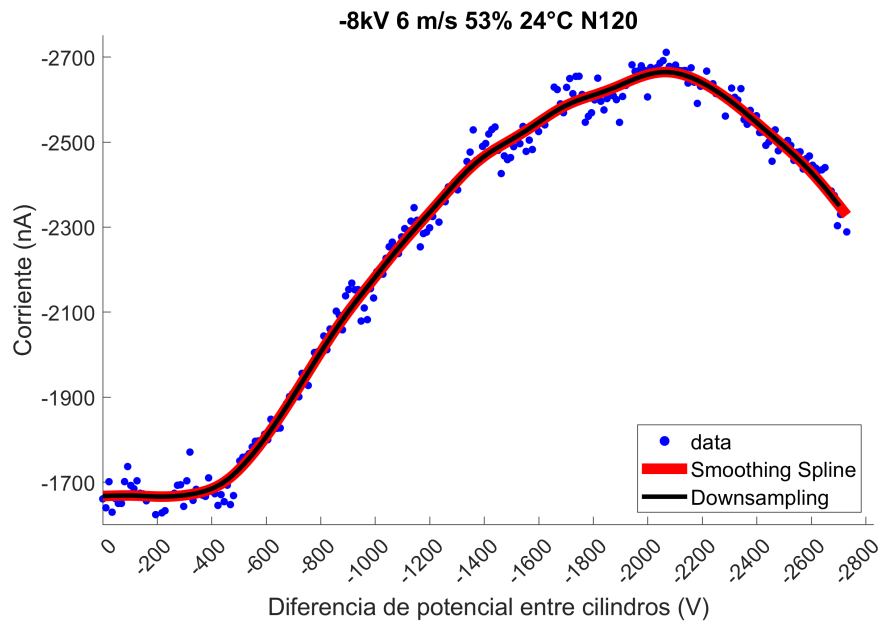
(b) Espectro de movilidad generado con nuestro código en el Apéndice D.2.



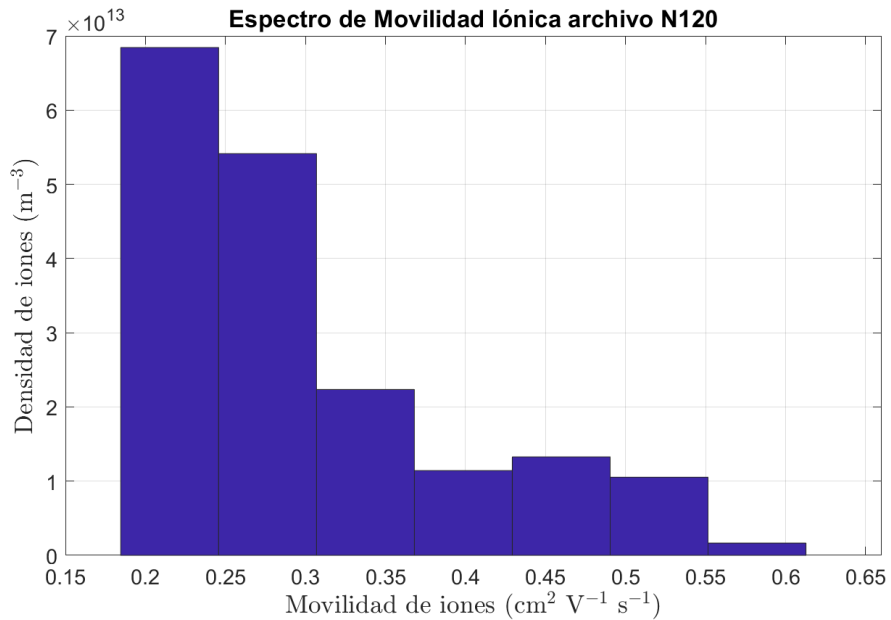
(c) Datos procesados de la referencia [26] analizados en [14] (línea continua negra).

Figura 4.11: Comparación entre el espectro de movilidad iónica de Xiaoqian y el calculado por nuestro grupo, para los datos de Allen.

4. ANÁLISIS DE RESULTADOS



(a) Ejemplo del proceso de submuestreo que se realizó para todas las mediciones.



(b) Espectro de movilidad generado con nuestro código en el Apéndice ??.

Figura 4.12: Submuestreo y espectro de movilidad asociado a los datos representados mediante los círculos negros en las Figs. 4.3 y 4.6.

para diferentes flujos de viento.

La Fig. 4.14b, como se mencionó en la anterior sección, tiene dos zonas de Ley de Ohm lineales y el método utilizado no necesariamente podrá retribuir resultados fiables para este tipo de estructuras.

4.3. Análisis

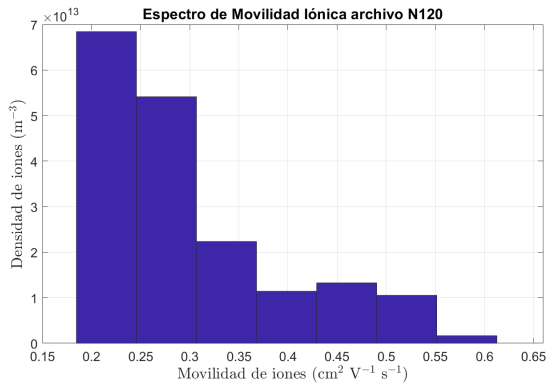
Procedimos a calcular y graficar el espectro de movilidad para los iones negativos según la teoría de la sección 2.2 traducida en código en el Apéndice D.2 como se muestra de la Fig. 4.13a a la 4.15d. En las Tablas 4.2 y 4.3 se presenta un compendio de los datos analizados para ambas polaridades de ionización. De todas las mediciones, se escogieron aquellas donde el ruido era mínimo con respecto a la magnitud de la señal. La segunda columna de ambas tablas corresponde a la movilidad promedio y la última, a su correspondiente radio iónico como se menciona en la sección 2.4. Estos dos valores están graficados en la Fig. 4.16.

Tabla 4.2: Resultados para iones negativos con polarización negativa para el voltaje de colección con respecto al cilindro central. La columna “movilidad” corresponde al promedio ponderado de todas las movilidades de los iones, Ec. 2.24.

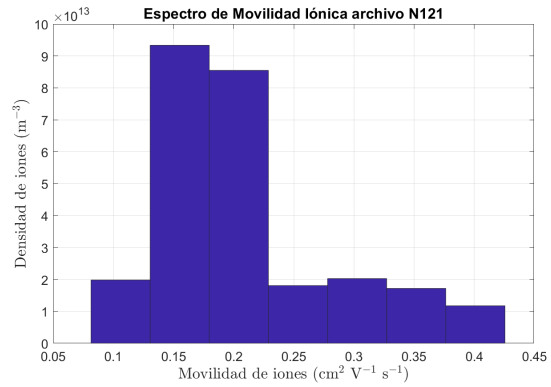
Parámetros	Movilidad ($\text{cm}^2 \text{V}^{-1} \text{s}^{-1}$)	Voltaje Crítico (V)	Densidad de iones promedio (m^{-3})	Intervalo de Movilidad ($\text{cm}^2 \text{V}^{-1} \text{s}^{-1}$)	Radio (nm)
N120 -8kV 6m/s	0.29	1421	2.55×10^{13}	0.18 - 0.61	1.00
N121 -8kV 3m/s	0.15	1371	2.39×10^{13}	0.08 - 0.43	1.47
N123 -7kV 6m/s	0.57	737	9.88×10^{12}	0.28 - 2.55	0.68
N122 -7kV 3m/s	0.27	784	9.84×10^{12}	0.11 - 1.28	1.05
N125 -6kV 6m/s	0.81	514	1.53×10^{12}	0.42 - 2.31	0.56
N124 -6kV 3m/s	0.40	526	1.10×10^{12}	0.23 - 0.84	0.83
E006 -5kV 6m/s	1.14	367	5.93×10^{11}	0.58 - 2.56	0.46
E007 -5kV 3m/s	0.40	517	2.44×10^{11}	0.37 - 0.54	0.83

No fue posible hacer cálculos de movilidad con flujo de viento nulo pese a que las curvas de mayor voltaje en las Figs. 4.1 y 4.2 presentan una especie de estructura como la teorizada, ya que en la Ec. (2.23) tiene al parámetro de velocidad de viento en el divisor. Sin embargo, debido a lo anterior, deducimos que a ± 7 y ± 8 kV de voltaje de ionización, existe suficiente diferencia de potencial de ionización (y a su vez de aceleración) como para dotar y proveer de energía cinética a los iones a través del campo eléctrico, esto es, existe un viento iónico para altos voltajes de ionización (véase la sección 2.5).

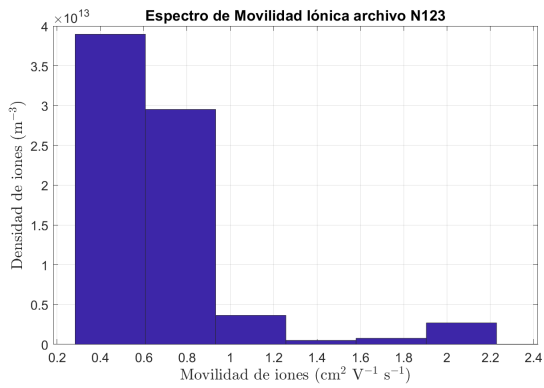
4. ANÁLISIS DE RESULTADOS



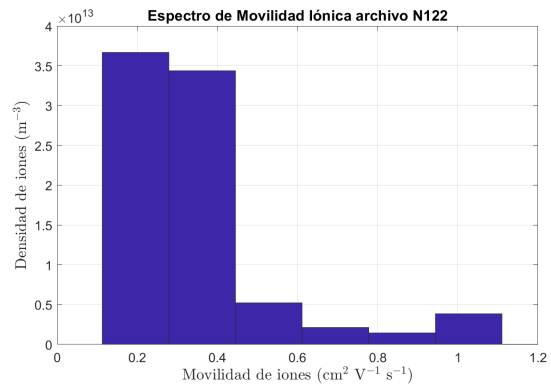
(a) Espectro de movilidad de iones negativos a -8 kV de voltaje de ionización y 6 ms^{-1} de flujo de aire.



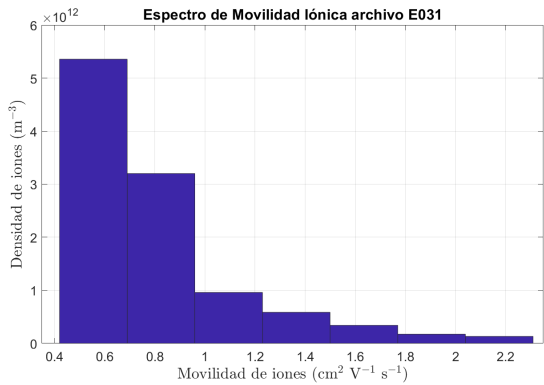
(b) Espectro de movilidad de iones negativos a -8 kV de voltaje de ionización y 3 ms^{-1} de flujo de aire.



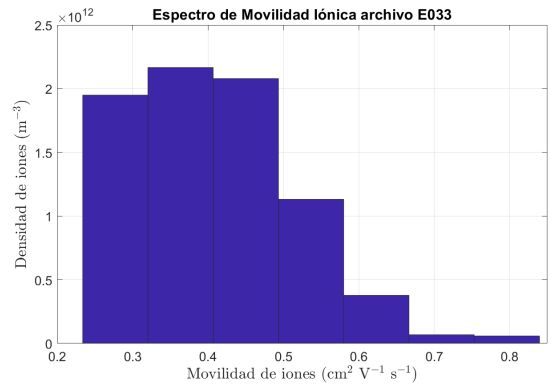
(c) Espectro de movilidad de iones negativos a -7 kV de voltaje de ionización y 6 ms^{-1} de flujo de aire.



(d) Espectro de movilidad de iones negativos a -7 kV de voltaje de ionización y 3 ms^{-1} de flujo de aire.



(e) Espectro de movilidad de iones negativos a -6 kV de voltaje de ionización y 6 ms^{-1} de flujo de aire.



(f) Espectro de movilidad de iones negativos a -6 kV de voltaje de ionización y 3 ms^{-1} de flujo de aire.

Figura 4.13: Espectros de movilidad en el intervalo de -6 a -8 kV para diferentes flujos de viento correspondientes a la Fig. 4.6.

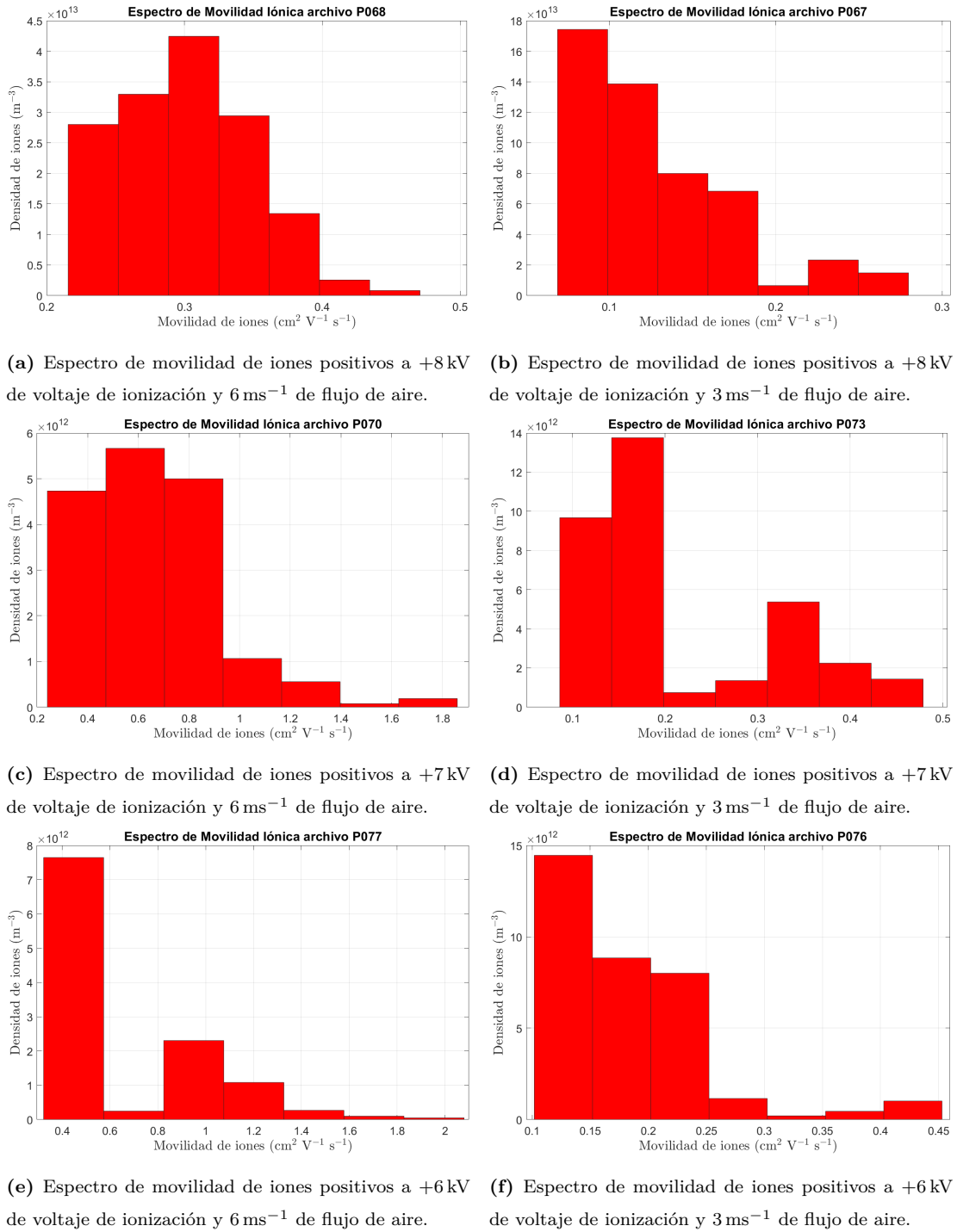
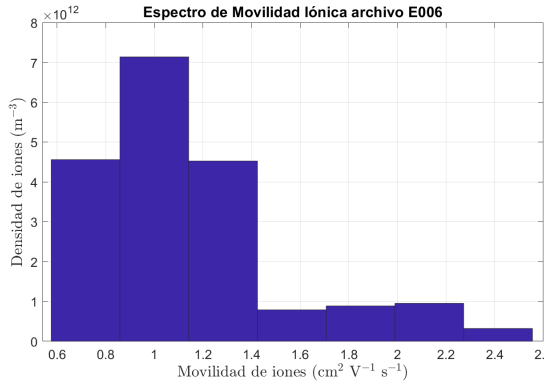
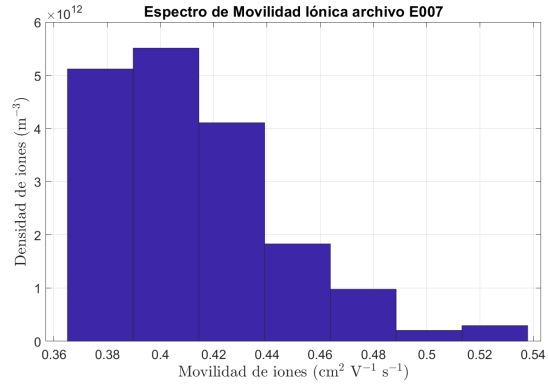


Figura 4.14: Espectros de movilidad en el intervalo de +6 a +8kV para diferentes flujos de viento correspondientes a la Fig. 4.10.

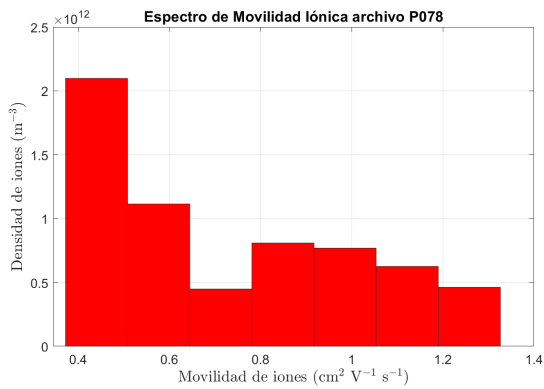
4. ANÁLISIS DE RESULTADOS



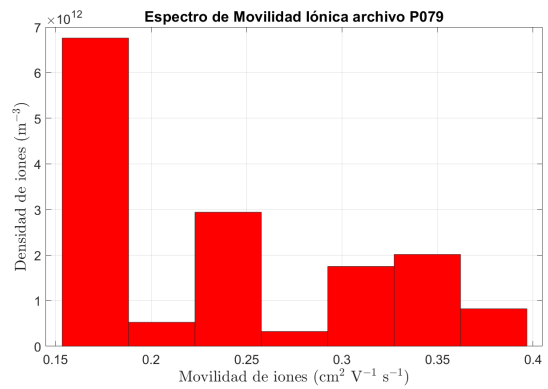
(a) Espectro de movilidad de iones negativos a -5 kV de voltaje de ionización y 6 ms^{-1} de flujo de aire.



(b) Espectro de movilidad de iones negativos a -5 kV de voltaje de ionización y 3 ms^{-1} de flujo de aire.

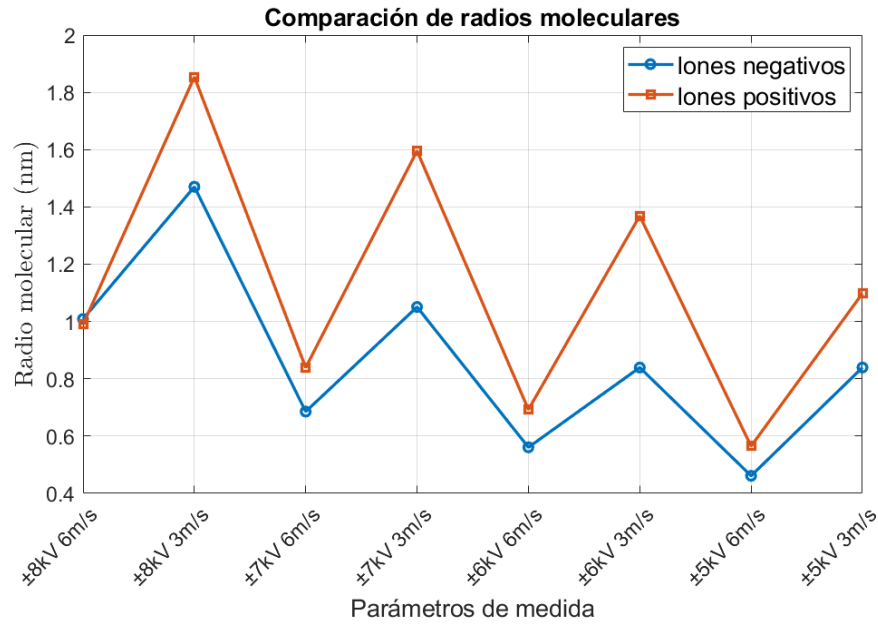


(c) Espectro de movilidad de iones positivos a $+5 \text{ kV}$ de voltaje de ionización y 6 ms^{-1} de flujo de aire.

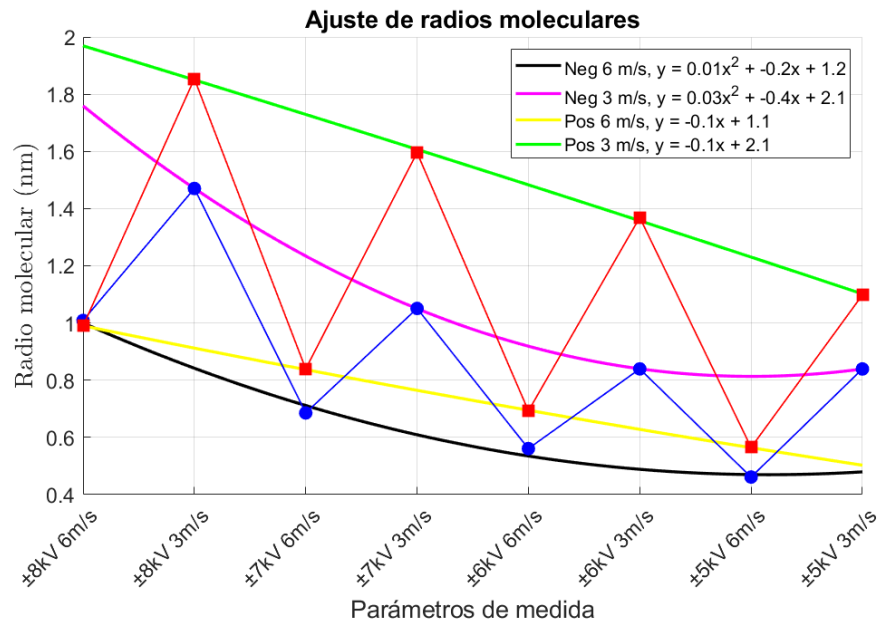


(d) Espectro de movilidad de iones positivos a $+5 \text{ kV}$ de voltaje de ionización y 3 ms^{-1} de flujo de aire.

Figura 4.15: Espectros de movilidad para $\pm 5 \text{ kV}$ para diferentes flujos de viento correspondientes a las curvas de menor magnitud de las Figs. 4.6 y 4.10.



(a) De las Tablas 4.2 y 4.3, se grafican la segunda columna (eje de las abscisas) y última columna (eje de las ordenadas), donde las movilidades promedio fueron transformadas a sus correspondientes radios iónicos según la Ec. (2.26).



(b) Ajuste polinomial de segundo orden. Los iones positivos obtuvieron un coeficiente cuadrático nulo hasta dos cifras decimales.

Figura 4.16: Visualización de las tendencias de los radios iónicos para diferentes parámetros de ionización y flujo de viento.

4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Tabla 4.3: Resultados para iones positivos con polarización positiva para el voltaje de colección con respecto al cilindro central. La columna “movilidad” corresponde al promedio ponderado de todas las movilidades de los iones, Ec. 2.24.

Parámetros	Movilidad ($\text{cm}^2 \text{V}^{-1} \text{s}^{-1}$)	Voltaje Crítico (V)	Densidad de iones promedio (m^{-3})	Intervalo de Movilidad ($\text{cm}^2 \text{V}^{-1} \text{s}^{-1}$)	Radio (nm)
P033 +8kV 6m/s	0.30	1400	2.11×10^{13}	0.22 - 0.47	0.98
P032 +8kV 3m/s	0.10	2110	2.99×10^{13}	0.07 - 0.28	1.85
P070 +7kV 6m/s	0.40	711	2.42×10^{12}	0.24 - 1.86	0.67
P073 +7kV 3m/s	0.13	1636	3.29×10^{12}	0.09 - 0.48	1.59
P077 +6kV 6m/s	0.56	751	1.56×10^{12}	0.32 - 2.08	0.69
P076 +6kV 3m/s	0.17	1243	1.93×10^{12}	0.10 - 0.45	1.36
P078 +5kV 6m/s	0.80	525	7.76×10^{11}	0.37 - 1.33	0.56
P079 +5kV 3m/s	0.25	833	1.08×10^{12}	0.15 - 0.40	1.09

4.4. Discusión

De las curvas características al comienzo de este capítulo, podemos notar que, a mayor voltaje de ionización y flujo de viento, mayor es la corriente detectada. A mayor humedad, menor es la carga neta detectada y mayor el ruido. También altera la estructura del espectro de movilidad, haciendo que el promedio de movilidad se reduzca.

De la Tabla 4.2 sobre iones negativos podemos deducir varias cosas, la densidad de iones promedio a cada espectro crece monótonicamente conforme aumenta el voltaje de ionización. Para un voltaje de ionización fijo, la diferencia de potencial de saturación crítica es mayor para velocidades de viento más bajas, a excepción de -8 kV , no sabemos el porqué. Faltaría poder medir voltajes más altos si es que la tendencia sigue o se rompe. Naturalmente, siendo la diferencia de potencial de saturación crítica inversamente proporcional a la movilidad promedio, lo anterior sucede en viceversa, mayor es la movilidad a mayores velocidades de viento. A mayor velocidad del aire (6 ms^{-1}), la densidad de iones es mayor en comparación con la misma configuración a menor velocidad (3 ms^{-1}).

El voltaje necesario para alcanzar el umbral crítico disminuye significativamente a medida que disminuye la densidad de iones, lo que sugiere que es más fácil alcanzar el umbral crítico con menos iones presentes. Esto puede deberse a varios factores, entre ellos, que una menor cantidad de iones implica un voltaje de ionización menor que no solo los produce, también los acelera, les implementa una energía cinética. Esto se traduce como una mayor velocidad, menor tiempo el que pasan entre los electrodos y se

requiere un mayor campo eléctrico entre cilindros para colectarlas y que no escapen; también es posible que se deba a la reducción de la densidad espacio-carga, cuyo valor afecta el comportamiento e interacción ión-ión de ambas polaridades y la interacción de los iones con moléculas neutrales. En palabras simples, a medida que la densidad de iones disminuye, la movilidad tiende a aumentar. Esto podría indicar que una menor concentración de iones facilita un movimiento más rápido o menos obstaculizado de los iones individuales.

El intervalo de movilidades del espectro de movilidad aumenta para las mayores velocidades de viento. Hay una consistencia entre la movilidad media y el rango de movilidad. Cuando la movilidad es alta, el intervalo de movilidad también tiende a ser más amplio, sugiriendo que, bajo ciertas condiciones, hay más variabilidad en cómo se mueven los iones y en su distribución de variedad de especies químicas.

En cuanto a la Tabla 4.2 de iones positivos, la densidad de iones y la movilidad muestran una correlación menos clara en comparación con los iones negativos. La tendencia no es muy clara. Dado un voltaje de ionización fijo, la diferencia de potencial de saturación crítica es mayor para velocidades de viento más bajas. Dicho lo anterior, es de esperarse que mayor es la movilidad iónica promedio a mayores velocidades de viento. A mayor velocidad del aire (6 ms^{-1}), aquí sucede justo lo contrario a los iones negativos; la densidad de iones es menor en comparación con la misma configuración a menor velocidad (3 ms^{-1}). El intervalo de movilidades sí parece seguir las tendencias como en el caso de los iones negativos.

En general, no nos fiamos mucho sobre cualquier posible conclusión acerca de los iones positivos, debido a que su configuración no sigue precisamente la estructura teorizada (múltiples zonas de saturación en vez de una única).

Para ambas tablas, la tendencia que más resalta es que, a mayor voltaje de ionización, menor es la movilidad eléctrica promedio. Esto nos habla de que, los voltajes de ionización más altos producen una distribución de conglomerados de iones con tendencia a un mayor radio molecular. Esta tendencia es clara observando la Fig. 4.16. También podemos observar que los iones positivos siempre tienden a ser de mayor tamaño que sus contrapartes negativas, a excepción de $\pm 8 \text{ kV}$ a 6 ms^{-1} , donde son iguales. Esto implica que, en términos de la presente investigación, observamos que la movilidad de los iones negativos es mayor, en buena concordancia con otros múltiples estudios presentados en la sección 2.3.

A nuestro mejor entendimiento, las curvas ajustadas son válidas para este rango de voltajes de ionización. En el mejor de los casos, estas reglas de correspondencia matemática podrían servirnos para inferir más allá de este intervalo, si es que la fenomenología física subyacente se sigue preservando.

4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Al realizar la comparación entre nuestros intervalos de movilidad calculados y aquellos en la Tabla 2.2, podemos inferir que, en nuestros espectros no solemos medir moléculas sencillas sin múltiples ligandos H_2O acopladas a ellas. Esta configuración experimental es limitada y no somos capaces de inferir, sin lugar a duda, las especies químicas exactas.

La energía de solvatación juega un papel fundamental en la comprensión de las interacciones químicas entre los iones y las moléculas de agua, facilitando la estabilización de los iones. Según el estudio presentado en la referencia [27], se aplicó un modelo híbrido que trata al solvente tanto como un medio continuo como a través de cálculos explícitos de las moléculas de solvente alrededor del ion. En dicho estudio, se calcularon los valores de la energía libre de Gibbs para tres moléculas de agua en torno a diversos aniones y cationes. Por ejemplo, para el ion hidróxido OH^- , se determinó que la energía libre de solvatación es de $-117.34 \text{ kcal mol}^{-1}$, indicando una fuerte solvatación y una alta favorabilidad energética para la asociación de tres moléculas de agua por mol de ion. Esta es tres veces mayor según reportado por [28]. En general, se observó que la energía de solvatación para una amplia variedad de aniones y cationes está en el orden de las centenas de kilocalorías por mol. Con respecto al ion hidróxido, como se menciona en la referencia [29], este tiende a formar estructuras híper coordinadas, lo que implica que, aunque su número de coordinación típicamente sugiere la adhesión de tres moléculas de agua, este forma enlaces de hidrógeno con hasta cuatro moléculas. Esta discusión respalda nuestra hipótesis que explica los intervalos de movilidad reportados.

Conclusiones

5.1. Resumen de los puntos principales y contribuciones

5.1.1. Diseño del condensador de Gerdien

- **Estructura:** El condensador de Gerdien consiste en dos cilindros coaxiales, un cilindro interior y un cilindro exterior, con una diferencia de potencial aplicada entre ellos. Las partículas cargadas son atraídas hacia el cilindro con carga opuesta, generando una corriente proporcional a la conductividad del aire.
- **Principio de Operación:** Las partículas cargadas son arrastradas al interior del cilindro mediante un flujo de aire. El aparato mide la movilidad de los iones a través de las curvas características de corriente y voltaje, proporcionando información sobre la conductividad y movilidad de los iones.
- **Recolección de Datos:** Un amperímetro detecta las corrientes generadas por las partículas cargadas. La corriente medida es directamente proporcional a la concentración y movilidad de los iones presentes en el aire.

5.1.2. Resumen de los resultados

En la presente tesis de investigación, se observaron varias tendencias importantes que influyen la medición y el comportamiento de los iones bajo diferentes condiciones. De las curvas características, podemos notar que, a mayor voltaje de ionización y flujo de viento, mayor es la corriente detectada. A mayor humedad, menor es la carga neta detectada y mayor el ruido. También altera la estructura del espectro de movilidad, haciendo que el promedio de movilidad se reduzca.

La densidad de iones crece monótonicamente con el aumento del voltaje de ionización. Las diferencias en el potencial de saturación crítica y la movilidad iónica sugieren

5. CONCLUSIONES

que a mayores velocidades de viento, los iones muestran una movilidad incrementada. Además, la densidad de iones es generalmente más alta en condiciones de mayor velocidad del aire. Interesantemente, para los iones positivos, las tendencias no fueron tan claras como para los iones negativos, y se observaron discrepancias que no se alinean completamente con las estructuras teorizadas, lo cual indica la necesidad de una investigación más profunda en esa área.

Los análisis sugieren que los voltajes de ionización más altos tienden a producir conglomerados de iones más grandes, indicando un mayor radio molecular. Esta observación fue consistente para los iones positivos, que generalmente resultaron ser de mayor tamaño en comparación con los negativos.

Estos resultados proporcionan una base sólida para comprender mejor los fenómenos físicos involucrados y sugieren que las metodologías desarrolladas podrían ser aplicables más allá de los rangos experimentales actuales, siempre y cuando se preserve la fenomenología física subyacente. Además, el análisis revela que las moléculas detectadas no son simples y tienden a llevar múltiples ligandos de agua, lo que plantea limitaciones en la capacidad de inferir las especies químicas exactas solo con los métodos empleados en este estudio.

En general, la movilidad de iones negativos es mayor que para su contraparte positiva, bajo parámetros de medida iguales, lo que sugiere que, en promedio, los iones negativos se acoplan en menor medida a ligandos de agua que los iones positivos. De igual manera y en consecuencia directa, el radio molecular de los iones positivos es mayor para parámetros de medida iguales con respecto a su contraparte negativa.

Principales contribuciones:

- Se desarrolló un condensador cilíndrico de Gerdien para la medición precisa de iones atmosféricos negativos y positivos generados por efecto corona, utilizando un método de análisis basado en las curvas características de voltaje contra corriente.
- Se obtuvieron curvas características de voltaje contra corriente para una amplia gama de parámetros experimentales, y sus respectivos espectros de movilidad iónica, que permitieron identificar los principales rangos de movilidad y sus abundancias relativas.
- Se modificó un ionizador comercial para producir iones negativos de manera controlada y efectiva, logrando una eficiencia de densidad de carga ocho órdenes de magnitud mayor que la reportada por el fabricante.
- Se implementó un sistema computacional de control automatizado mediante LabVIEW para facilitar la adquisición y análisis de los datos. Esto incluye la capacidad de controlar las fuentes de voltaje y registrar las medidas de corriente en tiempo real.

- Se aportó un código computacional en MATLAB basado en un método de análisis novedoso para calcular los espectros de movilidad.
- Se discutió la importancia y el interés de los iones negativos en diversos campos como la calidad del aire, la salud humana, la industria, la predicción de terremotos y el cambio climático.

5.2. Evaluación de los métodos utilizados y propuestas para futuros estudios

El ionizador comercial modificado demostró ser extremadamente eficaz, mejorando la densidad de carga hasta ocho órdenes de magnitud más que lo reportado por el fabricante original. Esto subraya la viabilidad de nuestro enfoque para producir iones de manera controlada y efectiva. Además, la implementación de un sistema de control automatizado mediante LabVIEW optimizó significativamente la adquisición y análisis de datos.

Del presente estudio, no podemos concluir cómo es que la humedad afecta específicamente a los iones negativos en contraste con los positivos. Tampoco contamos con la resolución suficiente para designar especies iónicas a cada movilidad con toda certeza, para ello se requeriría otras configuraciones experimentales como el tubo de deriva (*drift tube*, por su traducción al inglés). Los resultados podrían variar para diferentes condiciones atmosféricas o en diferentes ubicaciones geográficas.

Para detectar fielmente a los iones naturales, hará falta adoptar un dispositivo electrónico más sensible que el picoamperímetro Keithley: un electrómetro. Sabemos que la carga natural en la atmósfera es de alrededor de 1000 a 2000 iones por centímetro cúbico, lo que equivale a entre 1.6 a 3.2×10^{-16} A por segundo, esto es, décimas de femtoampere. Esa es la sensibilidad requerida.

No fuimos capaces de estudiar y realizar conclusiones sobre los casos donde existe una sección lineal de crecimiento en la corriente, un valle de saturación y una sección de decrecimiento de la corriente cuando el flujo de viento es nulo; esto solo a muy altos voltajes de ionización. Así mismo, tampoco fue posible para curvas características donde existan más de una zona de saturación, como vimos algunos ejemplos en iones positivos.

- Para caracterizar iones naturales, se propone reducir aun más las fuentes de ruido electrónico o utilizar un electrómetro como aparato de medición, por su mayor sensibilidad y resolución que el picoamperímetro, v. gr., un electrómetro.

5. CONCLUSIONES

- Variar a otros tipos de ionizadores y su respectiva distancia al Gerdien. Quizás considerar ir más allá de ± 8 kV en voltaje de ionización.
- Variar la geometría del Gerdien y los materiales con que está hecho. También existen variaciones donde el cilindro interior es un conjunto de electrodos segmentados.
- Realizar mediciones en ambientes controlados, esto es, temperatura, humedad y contaminantes (polvo, humo) definidos. Usar una cámara sellada para inyectar aire seco, o implementar humidificadores. Dicho lo anterior, sería posible añadir diferentes mezclas de gases en diferentes proporciones y presiones para su estudio.
- Para volver transportable a campo todo el sistema, se requiere de un circuito alimentado con baterías que reemplaze la necesidad de un picoamperímetro o electrómetro.
- Desarrollar una nueva teoría o extensión de la teoría existente para abordar los fenómenos observados en altos voltajes de ionización que presentan un patrón de crecimiento lineal de la corriente, un valle de saturación, y una sección de decrecimiento bajo condiciones de viento nulo; así como para casos que muestran múltiples zonas de saturación en las curvas características de iones positivos.
- Ampliar el estudio para incluir una descripción detallada de las interacciones entre iones en la atmósfera y sus trayectorias a diferentes niveles de densidad espacio-carga. Esto incluye otros desarrollos teóricos, experimentales e incluso simulaciones.
- Realizar mediciones en otras ubicaciones geográficas y bajo diferentes condiciones atmosféricas para su comparación.
- Se sugieren colaboraciones interdisciplinarias para enriquecer futuras investigaciones, como trabajar con meteorólogos, químicos ambientales, expertos en salud pública y psicólogos analíticos para continuar el estudio sobre cómo los iones negativos (y positivos) afectan la calidad de vida humana y cómo estos podrían mejorarla.

5.3. Reflexión final

Este viaje de investigación, que culmina con la presentación de esta tesis, ha sido tanto un desafío como una oportunidad para profundizar en el complejo mundo de la física atmosférica y la química de los iones. A través del desarrollo y la mejora de técnicas experimentales, como la implementación del condensador de Gerdien y el uso innovador de software para análisis de datos, este estudio ha extendido los límites de lo que podemos comprender sobre los iones en la atmósfera.

El proceso de medir y analizar iones atmosféricos ha demostrado ser intrincado y revelador. He aprendido sobre la delicada interacción entre variables ambientales como el viento y la humedad y su efecto en la movilidad y comportamiento de los iones, aspectos que son cruciales para aplicaciones prácticas en meteorología, salud pública y tecnologías ambientales. Cada fase de este estudio me ha ofrecido valiosas lecciones sobre la importancia de la precisión metodológica y la necesidad de adaptabilidad en la investigación científica.

Uno de los hallazgos más intrigantes, ha sido observar cómo las condiciones experimentales específicas afectan los resultados y cómo pequeñas variaciones pueden tener impactos significativos. Esto no solo resalta la complejidad de los sistemas naturales, sino también la necesidad de un diseño experimental cuidadoso y reflexivo.

Finalmente, este proyecto no solo ha fortalecido mi habilidad como investigador sino que también ha profundizado mi aprecio por la interdisciplinariedad en la ciencia. Los desafíos enfrentados y los conocimientos adquiridos serán fundamentales en mi futura carrera científica, guiando mi enfoque hacia la investigación aplicada con un impacto tangible en la sociedad.

Apéndices

Apéndice A

Historia del estudio de la física atómica y fisicoquímica

Ahora presentamos un *addendum*, con el fin de ubicarnos en el contexto histórico de la evolución del procedimiento y pensamiento conforme al método para medir la carga atmosférica. Incluye varios hitos importantes. Algunos de ellos son:

- 1733 Charles François de Cisternay du Fay descubrió que los cuerpos electrificados podían atraer objetos sin carga, lo que sugiere la existencia de dos tipos de electricidad: la positiva y la negativa.
- 1782 Volta trabajó con Lavoisier y Laplace en una serie de experimentos en los que encontraron una serie de procesos que producían electricidad atmosférica en los gases, presumiblemente al liberar un desequilibrio de cargas.
- 1785: Charles-Augustin de Coulomb descubrió la ley de Coulomb, que describe la fuerza de atracción o repulsión entre dos cargas eléctricas. En 1795 afirmó que las partículas de polvo en el aire eran responsables de la disipación de la carga eléctrica en el ámbar frotado. Postuló que las partículas de polvo o aire adquieren carga al impactar con un portador cargado y luego serían repelidas por él.
- 1834: Michael Faraday descubrió que la electrólisis de compuestos químicos en solución acuosa producía la liberación de gas en los electrodos, lo que sugiere la existencia de partículas cargadas en solución.
- 1859: Lord Kelvin perfeccionó los métodos que se habían desarrollado en investigaciones anteriores en un instrumento más cuantitativo para medir el gradiente potencial de la atmósfera. Luego propuso el registro continuo del gradiente de potencial atmosférico.
- 1895: Wilhelm Conrad Röntgen descubrió los rayos X, que permitieron la observación de la estructura atómica y molecular. Este descubrimiento fue oportuno

para la investigación de iones en gases, ya que pronto se descubrió que los “rayos Röntgen” hacían que los gases fueran eléctricamente conductores por ionización.

- 1896: C.T.R. Wilson descubrió la ionización atmosférica, lo que llevó a la invención de la *cámara de niebla*, un dispositivo utilizado para detectar partículas ionizantes, en un principio fueron los rayos X. Thomson y Rutherford atribuyeron la conductividad del aire a la producción de iones y, por lo tanto, Wilson concluyó que los núcleos de condensación eran iones creados por los rayos X.
- 1897: J.J. Thomson descubrió el electrón, una partícula subatómica con carga negativa, utilizando un tubo de rayos catódicos. También propuso el modelo del pudín de pasas del átomo, en el que los electrones se distribuyen uniformemente en un fondo de carga positiva.
- 1902: Elster y Geitel midieron la conductividad eléctrica del aire, lo que llevó al descubrimiento de la ionización natural del aire.
- 1904: Lord Rayleigh, y Sir William Ramsay descubrieron los gases nobles, que no reaccionan químicamente con otros elementos debido a su configuración electrónica completa.
- 1913: Niels Bohr propuso su modelo del átomo, que presenta electrones orbitando alrededor del núcleo en órbitas circulares estables.
- 1917: Ernest Rutherford descubrió el protón, una partícula subatómica con carga positiva, al bombardear láminas delgadas de metal con partículas alfa.
- 1932: James Chadwick descubrió el neutrón, una partícula subatómica sin carga eléctrica, utilizando un método similar al de Rutherford.

Estos descubrimientos sentaron las bases para la comprensión moderna de la estructura y comportamiento de los átomos e iones.

Las primeras mediciones de aerosoles eléctricos involucraron la investigación de partículas cargadas en la atmósfera y en gases expuestos a radiación ionizante. El interés por las partículas de aerosol cargadas surgió de la curiosidad sobre la naturaleza de la electricidad y las poderosas fuerzas que podía producir en forma de rayos. Durante la década de 1770, los primeros investigadores supusieron que el aire a buen clima (*fair weather*) llevaba una carga positiva [1]. Sin los métodos adecuados para medir la variación de carga con respecto a la altitud, los investigadores de la época no se dieron cuenta de que la mayoría de la carga positiva se lleva en la atmósfera muy por encima del suelo. Las observaciones tempranas sobre las fuentes de la electricidad atmosférica y el transporte de la electricidad no se comprendieron hasta años más tarde.

Volta, Lavoisier y Laplace trabajaron en conjunto en el año 1782, en una serie de experimentos donde hallaron varios procesos y fenómenos que ellos denominaron como

electricidad atmosférica en gases, debido a la liberación de un imbalance de cargas, con esto exploraron el concepto de gradiente de potencial eléctrico en la atmósfera. Varios científicos les siguieron, buscaban medir la variación del gradiente de potencial a lo largo del día además de su correlación con los estados del clima, buen tiempo o tormentas eléctricas [2].

Tras el descubrimiento de los rayos X en 1895, rápidamente se observó la capacidad de generar portadores de carga. Luego se exploró más sistemáticamente la naturaleza de los iones en gases. En 1897 Rutherford estableció la conexión entre los portadores de carga atmosférica y las partículas de aerosol cuando observó que las partículas finamente divididas en el aire aceleraban la pérdida de conductividad del aire después de retirar una fuente constante de ionización. Esta teoría ha permanecido en el corazón de la teoría del ion-aerosol durante más de cien años. Sin embargo, todavía existe la necesidad de explorar la física de los iones de aire y sus interacciones con los aerosoles atmosféricos dentro y más allá del marco de Rutherford.

A.1. La física atmosférica según Feynman [30]

La atmósfera de la Tierra es un circuito eléctrico vivo, conlleva un gradiente de potencial eléctrico, con un aumento del campo eléctrico de unos 100 V por metro a medida que uno se desplaza hacia arriba desde la superficie; esto debido a que hay pequeñas corrientes eléctricas en la atmósfera y el aire no es un aislante perfecto. La conductividad del aire varía con la altitud y la ubicación geográfica y se ve afectada por la presencia de iones producidos por los rayos cósmicos y otras fuentes. Los iones con mayor movilidad, son aquellos que fueron formados por los rayos cósmicos, y poseen una velocidad de alrededor 1cm/s bajo un campo de $100 \text{ V/m} = 1 \text{ V/cm}$. Los de menor movilidad, son conglomerados de partículas que fueron atraídas inicialmente por un nucleador cargado eléctricamente y por consiguiente, recoge a los iones pequeños. Debido a que los iones más gigantescos son lentos bajo la influencia de un campo eléctrico, por consiguiente, estos provocan que la conductividad total se reduzca en promedio. Se sigue que la conductividad del aire es sumamente variable y suceptible a la cantidad de “suciedad” y multitud de parámetros atmosféricos. No es de sorprenderse que la conductividad cerca de la superficie del suelo de la Tierra varí enormemente de lugar a lugar, día a día y de momento a momento. Inclusive en las condiciones más ideales, se sabe que el gradiente de potencial varía entre 90 y 120 V a lo largo de un día.

Aun cuando la densidad de corriente promedio en el aire a nivel del suelo sea de algunos picoampers por metro cuadrado, la corriente total que atraviesa toda la superficie terrestre es de 1,800 A. La superficie de la Tierra tiene una carga negativa y la diferencia de potencial eléctrico total desde la superficie hasta la parte superior de la

A. HISTORIA DEL ESTUDIO DE LA FÍSICA ATÓMICA Y FISICOQUÍMICA

atmósfera es de unos 400,000 V a lo largo de toda la atmósfera (hasta 50 km de altura donde el campo ya es insignificante), estamos hablando de unos 700 MW de potencia. Esto únicamente bajo condiciones eléctricas comunes propias de una atmósfera “limpia” y con buen clima. Por supuesto, las circunstancias sobre el mar abierto se acercan más al caso ideal antes mencionado.

Las tormentas eléctricas y los relámpagos son las fuentes de las corrientes atmosféricas, ya que traen cargas negativas a la Tierra. Las tormentas eléctricas se pueden considerar como baterías que bombean electricidad a la capa superior y mantienen la diferencia de voltaje. Hay alrededor de 40 mil tormentas por día en todo el mundo, y la actividad total de tormentas se correlaciona con la variación en el campo eléctrico atmosférico. La distribución de carga dentro de una tormenta normalmente tiene un exceso de carga positiva en la parte superior y negativa en la parte inferior. Esto crea diferencias de potencial lo suficientemente grandes como para descomponer el aire y crear descargas de rayos. Comprender los procesos dentro de una tormenta eléctrica es crucial para comprender las complejidades del clima y las condiciones atmosféricas. En resumen, la explicación del comportamiento de las corrientes eléctricas es compleja y no del todo comprendida. Hay algunas teorías que intentan explicar la separación de cargas en una tormenta eléctrica, pero ninguna de ellas está libre de problemas o preguntas. Nuestro conocimiento de la electricidad atmosférica y el fenómeno de las tormentas sigue creciendo, y hay mucho más por descubrir y comprender en el futuro.

Apéndice B

Formación de aniones atmosféricos por procesos naturales y artificiales

Las fuentes principales tanto naturales como artificiales en orden de importancia y abundancia:

- Rayos cósmicos en la atmósfera. Los rayos cósmicos son ubicuos en la atmósfera terrestre, estos ionizan el aire. Consisten en un 88 % de protones, rayos γ y rayos X, un 10 % de núcleos de helio (α), un 1 % de electrones y positrones (β), y el 1 % restante está compuesto por partículas más pesadas. Al entrar en la atmósfera, los rayos cósmicos primarios interactúan con las partículas atmosféricas y producen rayos cósmicos secundarios debido a colisiones posteriores. Esta cascada de partículas luego llega a la superficie terrestre. Este proceso es particularmente frecuente en altitudes elevadas, donde la concentración de iones atmosféricos es mucho mayor que en elevaciones más bajas. Son las principales fuentes de energía que generan a los aniones aéreos en los océanos. La densidad de estos a lo largo de la troposfera se encuentra entre 500 y 1000 iones por cm^3 [12].
- La descomposición radiactiva de fuentes naturales como el gas noble radón (^{222}Rn) produce iones en la atmósfera. La descomposición de isótopos radiactivos ^{238}U , ^{232}Th y ^{40}K libera partículas cargadas, que pueden chocar con otras partículas atmosféricas y crear iones. El radón proviene de la descomposición natural del uranio o el torio, elementos que se encuentran en rocas, suelos y agua. Sucede a través de fracturas en las rocas como un producto de desintegración particularmente de ambas series de uranio (^{238}U) y torio (^{232}Th). Puede filtrarse en edificios a través de grietas en los cimientos y acumularse en el interior, especialmente en áreas mal ventiladas [12].
- Efecto fotoeléctrico incluyendo a la luz del sol, preponderantemente el espectro ultravioleta. El generador de iones negativos que utiliza una fuente ultravioleta

para irradiar material conductor de electricidad, Se utiliza una lámpara ultravioleta para irradiar materiales metálicos, que expulsan electrones fotoeléctricamente. Los electrones luego chocan con las moléculas de aire y generan NAI. Por otro lado, los NAI pueden ser producidos por una cierta longitud de onda que ioniza directamente las moléculas del aire. En realidad, la ionización mediada por UV es la fuente de NAI dominante a los 60 km de altitud de la atmósfera. Estos NAI altamente concentrados en las capas superiores de la atmósfera se difunden a la superficie del suelo a bajas velocidades. La ionización por radiación ultravioleta no es un contribuyente principal de NAI en la atmósfera inferior debido a la baja dosis de rayos UV disponible en esta capa [31, 32].

- Descarga de corona natural y artificial, incluidos truenos y relámpagos. La atmósfera que rodea la tierra está sujeta a un campo eléctrico natural y su intensidad fluctúa continuamente bajo influencias tanto locales como globales. Las influencias locales incluyen ubicación geográfica y condiciones climáticas como tormentas eléctricas, lluvia, niebla, neblina, etc; los hechos globales se refieren a variaciones clásicas diarias del campo eléctrico. Cuando puntas de hojas o ramas de árboles tienen una gran diferencia de potencial respecto a los campos eléctricos de su entorno, ocurren descargas de corona y pueden liberarse NAIs. Generalmente, las descargas de corona ocurren en condiciones atmosféricas bajo campos eléctricos intensos. Por ejemplo, en un área montañosa, los potentes campos eléctricos y la baja presión atmosférica promueven el inicio de la descarga de corona. Es de esperarse que los NAI se liberarán en una gran cantidad después de tormentas eléctricas y relámpagos. Las descargas de corona artificiales son una forma eficiente de generar NAI [1].

Cuando un alto voltaje negativo se aplica a un electrodo y el campo eléctrico aplicado es lo suficientemente alto, ocurren descargas de corona. Si el electrodo cargado cuenta con una punta afilada, el campo alrededor de la punta será significativamente más alto que en otras partes y el aire cerca del electrodo puede ionizarse y se generarán NAI. La intensidad de la descarga de corona depende de la forma y el tamaño de los conductores, así como la diferencia de potencial aplicada. Conductores irregulares, especialmente de punta afilada, dan a lugar a más descargas que un conductor suave y los conductores de gran diámetro producen una corona menos intensas que los de pequeño diámetro; cuanto mayor es el voltaje aplicado, más NAI se originarán. Cuanto más cerrada sea la brecha entre electrodos, se detectan una mayor concentración de NAI debido a una generación continua de NAIs debido a que las descargas de corona están íntimamente relacionados con un proceso de reacción en cadena llamado avalancha de electrones [33].

- Las fuerzas cortantes en el agua (efecto Lenard). Número considerable de NAIs se encuentran debajo de cascadas o en las costas. Estos NAI nacen a partir del

efecto Lenard, también llamado electrificación por atomizador o efecto cascada. Su estudio ha demostrado que los NAI se crearon a partir de las moléculas de aire circundantes al cargarse negativamente cuando las gotas de agua chocan entre sí o con un sólido mojado para formar una fina pulverización de gotas. El estudio también mostró que varios factores pueden afectar el grado de separación de carga en los procesos de pulverización y, por lo tanto, puede afectar la generación y concentración de NAI. Estos factores incluyen la temperatura de la gota de agua, impurezas disueltas, velocidad de la ráfaga de aire que incide y superficies de impacto extrañas. Basado en el “efecto Lenard”, el aparato de corte de agua (*water shearing appliance*) ha sido diseñado para generar NAI [34]. El cizallamiento o tensiones de corte del agua solo produjo iones superóxido (O_2^-) que estaba unido a grupos de moléculas de agua para formar la estructura $\text{O}_2^-(\text{H}_2\text{O})_n$, y se consideró esencialmente como una fuente natural de NAI.

- Fuentes de origen vegetal. Las plantas tienen la capacidad de generar NAI en condiciones normales de crecimiento y se consideran productores naturales para la generación de NAI. Diferentes plantas liberan diferentes cantidades de NAI en condiciones de crecimiento natural. Sin embargo, en un crecimiento normal condiciones, las plantas liberaron concentraciones muy bajas de NAI ($<200 \text{ cm}^{-3}$). Cabe señalar que las plantas podrían liberar grandes cantidades de NAI bajo estimulación mediante campo eléctrico pulsado (PEF *pulse electric field*). Después de la estimulación del PEF, se detectaron más de $3.5 \times 10^6 \text{ cm}^{-3}$. Varios parámetros pueden afectar la liberación de NAI bajo estimulación de PEF, como las especies de las plantas y las diferencias de potencial aplicadas, también la intensidad de luz, temperatura, intervalo y ancho de pulso de PEF. Esta es una gran alternativa a los métodos artificiales de creación de aniones [21].

Como ya vimos, los iones de aire se forman a través de un intercambio complejo de procesos que pueden variar dependiendo de varios factores, incluyendo la altitud, la hora del día y las condiciones climáticas. Comprender la formación de iones de aire es importante para comprender su impacto en los procesos atmosféricos, la salud humana y los ecosistemas.

El proceso de ionización crea “iones primarios” que evolucionan a través del proceso de hidratación y formación de grupos de iones en cúmulos cargados, conocidos como pequeños aniones aéreos. La vida útil de los iones pequeños no dura más de 100 s y es inversamente proporcional a la concentración de aerosoles en el aire. La abundancia de fondo de pequeños NAI en un ambiente limpio es de unos pocos cientos por centímetro cúbico. Las unidades de movilidad se pueden escribir como $\text{cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$, lo cual es conveniente para los iones atmosféricos porque la movilidad de un ion típico es $1 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1} = 1 \times 10^{-4} \text{ m}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$.

Los iones más pequeños continuamente se forman gracias a la radiación cósmica o a la radioactividad natural de la Tierra. El proceso de la pérdida de carga en órdenes de

B. FORMACIÓN DE ANIONES ATMOSFÉRICOS POR PROCESOS NATURALES Y ARTIFICIALES

tiempo que va desde los nanosegundos hasta los segundos, ocurren por la recombinación y adhesión a aerosoles. En promedio y de forma natural, los encontramos en densidades entre los 100 - 200 cm^{-3} . En presencia de precursores ionizantes, los podemos encontrar en un orden de magnitud mayor.

Además de las fuentes de ionización anteriormente mencionadas, los iones también pueden provenir de artefactos creados por el hombre como las líneas de transmisión eléctrica de alta tensión, las emisiones del escape de vehículos motorizados como automóviles e incluso jets, sobretodo los que funcionan en base al diesel donde el 80% ($1 \times 10^9 \text{ cm}^{-3}$ iones) de las partículas despedidas están múltiplemente (± 4) cargadas en igual proporción de polaridad.

La atmósfera terrestre es un circuito eléctrico activo, con un campo eléctrico que aumenta aproximadamente 100 V por metro desde la superficie debido a corrientes eléctricas. La conductividad atmosférica se ve influida por la ubicación, altitud y la presencia de iones. Estos iones varían en movilidad, siendo los más pequeños y rápidos formados por rayos cósmicos y los más lentos compuestos por partículas más grandes, afectando la conductividad general. Así, la conductividad del aire es dinámica y cambia según las condiciones atmosféricas y la “suciedad” presente.

Aunque la densidad de corriente en el aire cerca del suelo es baja, la corriente total a través de la Tierra es de 1,800 A. Esta corriente genera un potencial de 400,000 V a través de la atmósfera, equivalentes a unos 700 MW de potencia en una atmósfera ideal. Las tormentas eléctricas y los relámpagos alimentan este sistema, llevando cargas negativas a la Tierra. Actúan como baterías, manteniendo la diferencia de voltaje atmosférico. Aunque intentamos entender estos fenómenos, el comportamiento eléctrico de la atmósfera y las tormentas sigue siendo complejo y no totalmente entendido, con teorías aún en evaluación y muchos misterios por resolver en el futuro [30].

Los iones atmosféricos, grupos de moléculas cargados eléctricamente, están profundamente conectados con el comportamiento de otras partículas que componen a los aerosoles atmosféricos. Las primeras observaciones de Rutherford (1897) revelaron que las partículas de aerosol reducen la concentración de iones y la conductividad eléctrica del aire debido a la adhesión de estas primeras con las segundas. Si bien este principio ha sido fundamental para la teoría de los iones y los aerosoles durante más de un siglo, todavía es necesario explorar la física de los iones del aire y sus interacciones con los aerosoles atmosféricos. Se puede obtener información sobre el comportamiento de las partículas de aerosol mediante el estudio de los iones atmosféricos, ya que los medimos utilizando técnicas experimentales que no son aplicables a partículas de aerosol más grandes. Esto es debido a que las propiedades eléctricas de los iones los hacen susceptibles a diferentes métodos de análisis que los aerosoles, por su característica carencia de carga eléctrica neta, no lo permiten, i.e., no podemos cambiar la trayectoria de los aerosoles con campos eléctricos o magnéticos modestos.

El proceso en el que las moléculas de gas se combinan para formar partículas a gran escala, se conoce como nucleación de aerosoles. Hay dos tipos de nucleación: homogénea y heterogénea. Mientras que la nucleación heterogénea requiere la presencia de partículas preexistentes para permitir la condensación del vapor de agua, la nucleación homogénea es una reacción química que normalmente produce compuestos sulfúricos y sales de amonio. Estas partículas preexistentes, también conocidas como núcleos de condensación (*CN condensation nuclei*, por sus siglas en inglés), pueden funcionar como núcleos precursores para el desarrollo de gotas de nubes. Las concentraciones de CN varían según el ambiente. La nucleación inducida por iones, donde el vapor se condensa sobre un ion, es teóricamente posible pero aún no se ha observado en la atmósfera. El papel de los iones en los procesos climáticos sigue siendo incierto y controvertido.

La composición química de los iones atmosféricos está influenciada por varios factores, como la altitud, la latitud y los niveles de contaminación local. En la atmósfera baja, cerca de la superficie terrestre, los iones están compuestos principalmente de gases atmosféricos comunes como el nitrógeno y el oxígeno, así como trazas de vapor de agua y dióxido de carbono. A medida que se asciende en la atmósfera, la composición química de los iones se vuelve más compleja debido a la presencia de diferentes tipos de moléculas y un mayor número de agentes ionizantes. Además, esta última puede variar en gran medida según la ubicación geográfica. Por ejemplo, en áreas urbanas altamente contaminadas, es probable que la composición de iones se vea afectada por contaminantes de origen humano, como compuestos de azufre y nitrógeno. En contraste, en entornos remotos o prístinos, los iones pueden estar compuestos predominantemente de sustancias de origen natural, como compuestos orgánicos provenientes de emisiones de plantas o partículas de sal marina. La densidad promedio en ambientes naturales de buen clima y alejados de la urbe, se encuentra entre 500 y 1000 iones por cm^3 .

El posible efecto del ciclo solar en el clima terrestre ha sido motivo de controversia, y hay quienes proponen que los rayos cósmicos influyen en los sistemas meteorológicos del planeta. Se ha detectado una correlación entre el flujo de dichos rayos, la extensión de las nubes y las variaciones a corto plazo en la radiación cósmica, también se han asociado a cambios en la cobertura nubosa. El flujo de rayos cósmicos es modulado por el ciclo solar, debido a que el campo magnético solar desvía los rayos cósmicos menos energéticos durante los máximos solares. Estos rayos pueden ionizar moléculas atmosféricas, y las alteraciones en la ionización acontecen en los mínimos solares. Aun no existe evidencia empírica directa que avale o refute la suposición de que la ionización incide en los núcleos de condensación y la cobertura de nubes en la atmósfera, lo cual demanda más observaciones y el diseño de instrumentos idóneos para examinar tal hipótesis.

Los productos de desintegración del radón (^{222}Rn) emitidos desde el suelo son importantes contribuyentes a la ionización en la superficie terrestre. Una partícula alfa del radón típicamente tiene una energía de 5.5 MeV, y dado que la energía de ionización

B. FORMACIÓN DE ANIONES ATMOSFÉRICOS POR PROCESOS NATURALES Y ARTIFICIALES

promedio es alrededor de 35 eV, cada partícula alfa producirá aproximadamente entre 15,000 y 20,000 pares de iones por centímetro viajado a través del aire, para un total de 1×10^6 . Los rayos cósmicos, partículas de elevada energía originarias del espacio exterior al sistema solar, provocan aproximadamente el 20% de la ionización a nivel del suelo. No obstante, el potencial ionizante de una de estas partículas, que generalmente se desplaza a velocidades sub-relativistas, supera con creces el de una única partícula alfa proveniente de la desintegración radiactiva terrestre. La tasa promedio de producción de iones experimenta una variabilidad considerable, pero un valor admitido de pares de iones para la media a largo plazo es de $10 \text{ cm}^{-3} \text{ s}^{-1}$. El número de iones se incrementa con la altitud, dado que la contribución relativa de los rayos cósmicos a la ionización se intensifica, así como su influencia. Otras fuentes menos relevantes de iones atmosféricos incluyen los iones de corona generados por campos eléctricos intensos (por ejemplo, los presentes bajo líneas de alta tensión). Los iones también pueden originarse a partir de la fragmentación de gotas de agua, lo cual conlleva a mayores concentraciones en las cercanías de cascadas y costas [1].

En las últimas décadas, en virtud del creciente interés en la agenda política alrededor del cambio climático y la contaminación atmosférica, aumentó enormemente la investigación sobre la caracterización de estas partículas. En el Apéndice C queda claro que los iones poseen implicaciones significativas para el clima y la salud, lo que motiva una mayor comprensión de sus mecanismos de producción, crecimiento, formación y subsecuente eliminación.

Los iones negativos son la llave de las pruebas de datación y sus aplicaciones son cada vez más sorprendentes. Se propone estudiar sus propiedades fundamentales. Anteriores estudios realizados por nuestro grupo de investigación han exhibido propiedades inusitadas de estas extrañas especies, como estados metaestables o de muy poca duración y que se desvanecen con las mismas reglas del decaimiento radiativo [35].

Aplicaciones del estudio de los Iones

Negativos

C.1. Posible estudio de los terremotos

A lo largo de los últimos 6 años México ha sufrido una alta y lamentable actividad sísmica. El daño en pérdidas humanas, materiales y psicológico es incalculable, sobre todo en los años 2017 y 2022. Mucho misticismo mágico ha surgido como discurso en la sociedad al rededor de la fecha 19 de septiembre debido a una serie de improbables coincidencias. La ciencia mundial todavía no logra resolver el problema de la predicción de terremotos de forma eficaz y óptima. Este tema se aborda de forma exhaustiva sobre todo según el criterio de análisis en la dinámica de la tectónica de placas, en particular, los eventos de deslizamiento lento (SSE *Slow Slip Events*) [36].

Sin embargo, existen otras líneas de investigación alternativas e incluso, aparentemente inconexas en su fenomenología fundamental. Aun cuando en la actualidad el pronóstico de sismos devastadores no es una realidad certera, existen redes de estaciones de medición en todo el mundo ubicadas en puntos críticos para la alerta temprana en varias decenas de segundos hasta minutos antes. Además de los geófonos convencionales que detectan las vibraciones del subsuelo de la tierra, en el continente asiático a menudo se utilizan animales que responden a los cambios del infrasonido, las ondas electromagnéticas, el campo magnético de la tierra, la ionización de la atmósfera y particularmente, tienen una alta sensibilidad a las variaciones del campo eléctrico. Indonesia es un ejemplo donde fue crucial reemplazar el uso de animales con sensores electrónicos, de modo que no fuera necesario alimentar a los animales y cuidarlos. La estación propuesta se centró en el uso de un tubo de Gerdien para medir la ionización del aire, mismo aparato cuyo funcionamiento se investiga en la presente tesis, ya que se constató que varios terremotos mostraron un cambio significativo en la ionización del

aire varias horas antes del terremoto, en ocasiones un día de antelación [37].

La hipótesis que nos invita a desarrollar esta línea de investigación, trata de que el proceso primario de perturbación electromagnética observada antes de grandes eventos sísmicos se debe a la ionización del aire cerca de fallas tectónicas activas antes del terremoto. Se cree que el incremento en la ionización es causada por una mayor emanación de radón o por la compresión mecánica entre rocas, la cual genera un exceso de carga. Posteriormente, después de una mayor ionización, la radiación infrarroja térmica observable desde los satélites puede ser emitida, afectando las capas de la ionosfera y, por lo tanto, la recepción de señales de ultra baja frecuencia en la Tierra. Las variaciones locales de la ionosfera generan entonces una emisión electromagnética. La misión del satélite DEMETER ha sido fundamental para comprender los procesos en la ionosfera durante los terremotos y ha demostrado los procesos físicos que preceden a los grandes eventos sísmicos [38]. Este artículo científico es una revisión del uso de la teledetección por satélite en sismología. El artículo discute una amplia gama de métodos satelitales que actualmente se están aplicando en sismología, incluyendo sensores ópticos, sistemas de radar, estudios de infrarrojos térmicos y observaciones electromagnéticas. También discute las ventajas y limitaciones de estos métodos y su potencial para el desarrollo futuro. Los autores concluyen que los métodos de teledetección están siendo ampliamente utilizados para la investigación de terremotos y que los desarrollos futuros en este campo probablemente incluirán nuevas tecnologías como sistemas de radar de banda L, radiómetros de microondas de alta resolución y analizadores de gases.

Este otro artículo científico discute los desafíos que plantea el monitoreo a largo plazo de iones de aire en el marco de la predicción de terremotos. El documento proporciona un breve estado del arte, describiendo las principales hipótesis avanzadas para explicar las anomalías en las concentraciones de iones de aire que se formaron antes de los terremotos. Los autores luego describen la matriz de capacitores Gerdien desplegados por QuakeFinder en los Estados Unidos, California y cinco países del extranjero con el objetivo de identificar variaciones pre-terremoto en los datos de iones de aire. El artículo también presenta los resultados donde se desplegaron 125 contadores de iones de aire positivos y negativos uno al lado del otro a distancias crecientes a lo largo de cordilleras [39].

C.2. ¿Los iones negativos, un agente multimicrobicida?

Los antibióticos son un componente vital de la medicina moderna. La introducción de la penicilina en la década de 1940 redujo drásticamente las muertes por infecciones bacterianas. La incorporación en la medicina clínica de la terapia con penicilina y de la terapia con antibióticos derivada de la misma, ha revolucionado por completo el tratamiento de las infecciones bacterianas tanto en el hombre como en los animales, y

ha hecho que la gran mayoría de ellas, incluidas las más graves, sean susceptibles a un control terapéutico exitoso. Sabemos que antes de los antibióticos, la esperanza de vida rondaba por los 35 años. Cortarse con la espina de una rosa, siendo joven, sano y fuerte, aunado a si esta herida se infectaba y a su vez se conjugaba junto a una disminución de la efectividad del sistema inmune, podría llevar a la muerte en cuestión de una semana. La Peste Negra en el siglo XIV mató entre 75 y 200 millones de personas en Eurasia, dos tercios de la población en aquel territorio. Con alrededor de 10.4 millones de casos nuevos de tuberculosis cada año, casi un tercio de la población mundial son portadores del bacilo de la tuberculosis y están en riesgo de desarrollar la enfermedad activa [40].

Cuando se inundan con antibióticos, debido a malas prácticas de receta médica (e.g., para tratar virus de la gripe, lo cual es inútil o el uso excesivo en animales de consumo humano), las bacterias evolucionan, se vuelven resistentes e incluso compararán sus mecanismos de resistencia entre sí. Ahora están burlando a nuestros mejores antibióticos; faltan años e interés por parte de las farmacéuticas para desarrollar nuevos medicamentos. Estamos al final de la era actual de antibióticos de amplio espectro eficaces para tratar todas las infecciones bacterianas. La mayoría de las agencias internacionales reconocen este grave problema. Muchas resoluciones y recomendaciones se han propuesto y se han escrito numerosos informes en vano: el desarrollo de resistencia a los antibióticos es implacable. Los expertos médicos ahora advierten de un regreso a la era preantibiótica [41].

Hace cinco años, científicos e incluso grupos empresariales, advirtieron sobre el riesgo de una pandemia de origen zoonótico, para la cual la humanidad no estaba preparada [42, 43]. Este suceso se hizo realidad con el surgimiento del SARS-CoV-2, el virus causante de la enfermedad COVID-19. No hace falta detallar los efectos nocivos que esta ha provocado.

Aproximadamente hace cuatro décadas, empezó la investigación del efecto antimicrobiano de algunos iones negativos, aunque no de manera directa y exclusiva, sino, como procesos fundamentales para mecanismos inmunológicos, específicamente —en los fagocitos, la enzima NADPH oxidasa produce superóxido aniónico radical $O_2^{\bullet-}$ en grandes cantidades para su uso en los mecanismos de eliminación (que dependen del oxígeno) de patógenos invasores [44]. Dentro de las especies reactivas de oxígeno (ROS, por sus siglas en inglés *reactive oxygen species*), el $O_2^{\bullet-}$ es altamente reactivo, es capaz de oxidar así como de producir reacciones de óxido-reducción.

Los iones negativos aplicados a la atmósfera pueden tener efectos microbicidas y tentativamente, son capaces de frenar su propagación en este mismo medio, que es uno de los vectores de transmisión más difíciles de combatir, especialmente en lugares hacinados. Estudios sugieren y recomiendan su uso utilizado para la limpieza del aire, como benefactor para la salud humana o de animales y como componente del desarrollo vegetal. Otros tantos acreditan a los aniones por aumentar la salud psicológica, la pro-

C. APLICACIONES DEL ESTUDIO DE LOS IONES NEGATIVOS

ductividad y el bienestar general. Claro que lo anterior todavía queda por confirmarse, ha habido un gran debate alrededor de este tema (véase la sección de bacterias y virus de la Tabla C.1). Por otro lado, algunos estudios no muestran resultados concluyentes, sin embargo, la evidencia existente apunta hacia la confirmación de este hecho. Los informes también mostraron que los NAI podrían ayudar a las personas a aliviar los síntomas de alergias al polvo, esporas de moho y otros alérgenos. Las partículas finas (PM *particulate matter*) son uno de los principales contaminantes del aire que afecta la salud humana; los datos experimentales mostraron que los NAI podrían usarse para eliminarlas de manera muy eficiente, por lo que proponemos fabricar un prototipo con el cual, en una etapa posterior más allá de los alcances de este proyecto, podamos hacer pruebas concluyentes donde verifiquemos si este es un proceso viable y eficiente.

En la Tabla C.1 podemos encontrar una síntesis sobre estudios en los diferentes rubros ya tratados anteriormente. Cabe destacar que no solo se citan los que favorecen a este proyecto de investigación, sino también los estudios que reportaron efectos nulos por parte de los aniones en organismos.

Tabla C.1: Reportes de NAIs en organismos tomada y adaptada de [21].

Organismos	Descripción	Referencias
	Aumento significativo en el rendimiento de todas las tareas probadas expuestas a NAI	[45]
	Los NAI afectan la corteza cerebral, la serotonina y los nucleótidos cíclicos	[46]
	Los NAI del ionizador de turmalina disminuyeron la presión arterial en ratas	[47]
	Los NAI reducen la presión arterial, la serotonina y la dopamina	[48]
	Los NAI atenúan las concentraciones de lactato en sangre	[49]
	Los NAI mejoran la deformabilidad de los eritrocitos y el metabolismo aeróbico	[34]
	Los NAI son eficaces para el tratamiento de la depresión crónica	[50]
Humanos y animales	Los NAI activan las células asesinas naturales (NK) e inhiben la carcinogénesis en ratones	[51]
	La inhalación de NAI por ratas activó la secreción de células caliciformes	[52]
	Los NAI no juegan un papel apreciable en la función respiratoria	[33]

Continúa en la siguiente página...

C.2 ¿Los iones negativos, un agente multimicrobicida?

Tabla C.1 ...continua de la página anterior

Organismos	Descripción	Referencias
	El tratamiento con NAI para los trastornos del estado de ánimo es en general eficaz	[53]
	Exponer a los humanos a los NAI redujo la presión arterial	[54]
	Efectos de mejora del rendimiento cognitivo	[55]
	La exposición a los NAI alivia los síntomas del trastorno afectivo estacional	[56]
	Ningún efecto de los NAI sobre la concentración o el recambio de serotonina en ratas	[57]
	Ningún efecto de los NAI sobre la reducción de la presión arterial	[58]
	Ningún efecto de los NAI sobre la frecuencia cardíaca	[59]
	Ningún efecto de los NAI en la salud mental	[60, 61]
	Una revisión sistemática no sugirió efectos consistentes o confiables de los NAI en sistema cardiovascular y respiratorio, así como en salud mental	[62]
	Cantidad significativa de descomposición biológica de la bacteria <i>Serratia marcescens</i>	[63]
	Participación del superóxido en los efectos bactericidas sobre <i>Staphylococcus albus</i>	[64]
	El ionizador se puede utilizar para reducir la contaminación microbiana del aire en una clínica dental	[65]
	Los NAI resultaron en una inhibición significativa del crecimiento de <i>Candida albicans</i>	[66]
	Los altos niveles de NAI mataron directamente a <i>Salmonella Enteritidis</i>	[67]
	La exposición a los NAI produjo reducciones significativas en el número de colonias	[68]
	La sinergia del ozono con los NAI puede suprimir ciertas bacterias	[69]
Bacterias	La exposición a los NAI tiene un efecto letal en las células de <i>Pseudomonas veronii</i> hambrientas	[70]

Continúa en la siguiente página...

C. APLICACIONES DEL ESTUDIO DE LOS IONES NEGATIVOS

Tabla C.1 ...continua de la página anterior

Organismos	Descripción	Referencias
	Los ionizadores pueden tener un papel en la prevención de infecciones por Acinetobacter	[71]
	Los NAI tienen un efecto muy limitado sobre E. coli en semillas de frijol y de manzanas	[72]
	Es posible que se haya sobrestimado la acción bactericida debida a los NAI	[73]
	Los NAI inhibieron el crecimiento de E. coli y P. fluorescens	[74]
	Los NAI previnieron el 60 % de la infección por tuberculosis (TB) y el 51 % de la enfermedad de TB	[75]
	El ionizador inhibe las bacterias en el aire	[76]
	El efecto anti-Pseudomonas fluorescens de los vapores de aceites esenciales puede mejorado significativamente por la adición de NAI	[77]
	Los NAI mostraron inactivación de la bacteria E. coli	[78]
	Los NAI redujeron E. coli y Staphylococcus aureus en más del 97 %	[79]
	Desinfección de Serratia marcescens y Staphylococcus epidermidis	[80]
Fungus	Los NAI en hongos inhiben el crecimiento de Penicillium notatum	[81]
Virus	Virus Ionizer redujo la transmisión aérea de la cepa de la enfermedad provocada por el virus Roakin de Newcastle (NDV) en un promedio de 6.6 % a 27.7 %	[82]
	El peso fresco y seco de avena sativa aumentó después del tratamiento con NAI	[83]
	Los NAI promovieron el crecimiento de plántulas de Avena sativa	[83, 84]
	El consumo de oxígeno aumentó en la cebada después de la exposición a los NAI	[85]
	Los NAI aumentaron la altura de la planta en un 13-15 % y el peso seco en un 18 %	[86]
Plantas		

Continúa en la siguiente página...

C.2 ¿Los iones negativos, un agente multimicrobicida?

Tabla C.1 ...continua de la página anterior

Organismos	Descripción	Referencias
	Los NAI aumentaron ligeramente el contenido de nitrógeno total	[87]
	Las plantas de lechuga expuestas a NAI aumentaron el área foliar y el peso fresco	[88]
	Los NAI mejoraron el crecimiento de los brotes y el control bacteriano	[89]
	Los NAI mejoraron el peso fresco, los macroelementos y los microelementos en la col rizada	[90]

Códigos de programación en MATLAB

D.1. Código para ajustar un *cubic spline interpolation* y realizar el *downsampling* para su posterior análisis.

El presente código se puede encontrar en el siguiente repositorio de [GitHub](#).

```
1 % Clearing environment and figures, adding path
2 clear; clc; close all;
3 addpath('C:\Users\YourUser\Documents\YourDirectory\Subfolder');
4
5 % Define the base file name
6 baseFileName = 'ElectrometerNeg_007'; % Change this for different
   ↪ datasets
7 % File names derived from the base name
8 dataFileName = [baseFileName, 'downsample.dat'];
9 lvmFileName = [baseFileName, '.lvm'];
10
11 % Create an empty file if it doesn't exist
12 if ~isfile(dataFileName)
13     fileID = fopen(dataFileName, 'w');
14     fclose(fileID);
```

D. CÓDIGOS DE PROGRAMACIÓN EN MATLAB

```
15 end
16
17 % File names and pre-allocation
18 fileNames = {lvmFileName, dataFileName};
19 numFiles = numel(fileNames); % Use numel instead of length for
    ↪ efficiency
20 dataCell = cell(1, numFiles); % Preallocate cell array for data
21
22 % Data reading loop
23 for i = 1:numFiles
24     dataCell{i} = readmatrix(fileNames{i}, 'FileType', 'text');
25 end
26
27 % Data manipulation
28 reversed_col3 = flipud(dataCell{1}(:, 3)); % Reverse the third column
29 index_last_acceptable = find(~isnan(reversed_col3) & ~isinf(reversed_
    ↪ col3), 1);
30 if isempty(index_last_acceptable)
31     error('No acceptable values found in column 3.');
```

```
32 end
33 last_acceptable_value = reversed_col3(index_last_acceptable);
34 a = ceil(last_acceptable_value); % Ceiling operation
35 b = size(dataCell{1}, 1); % Directly obtaining the number of rows
36
37 % Generation of U and I based on linspace and direct assignment
38 U = linspace(0, a, b)';
39 I = dataCell{1}(:, 2);
40
```

```
41 % Smoothing using cubic smoothing splines
42 p = 1e-8; % More readable representation of the smoothing parameter
43 pp = csaps(U, I, p); % Use of cubic smoothing spline
44 I_new = ppval(pp, U); % Evaluate the smoothing spline
45
46 % Downsampling data
47 rows = size(U, 1); % Rows from U for consistency
48 factor = ceil(rows / 100); % Downsampling factor to get 100 points
49 data_reduced = downsample([U, I_new], factor); % Combine downsampling
    ↪ steps
50
51 % Writing downsampled data to file
52 dlmwrite(dataFileName, data_reduced, 'delimiter', '\\t');
53
54 % Further data processing for plotting
55 Un = dataCell{2}(:, 1);
56 In = dataCell{2}(:, 2);
57
58 % Data chunking for averaged plot
59 factor2 = 20; % Consider defining this at the top with other parameters
60 numChunks = floor(length(I) / factor2);
61 U2 = linspace(0, a, numChunks)';
62 I2 = arrayfun(@(k) mean(I((k - 1) * factor2 + (1:factor2))), 1:
    ↪ numChunks)'; % Use arrayfun for compactness
63
64 % Plotting enhancements
65 figure;
66 set(gcf, 'Position', [300, 100, 777, 555]); % Set figure size
```

```
67
68 % Increase the size of scatter points and plot lines
69 scatterSize = 20; % Larger scatter size for better visibility
70 scatter(U2, I2, scatterSize, 'MarkerFaceColor', 'b', 'MarkerEdgeColor',
    ↪ 'b'); % Enlarged scatter points
71 hold on;
72 plot(U, I_new, 'r', 'LineWidth', 7); % Make smoothing spline thicker
73 plot(Un, In, 'k', 'LineWidth', 3); % Make downsampling line slightly
    ↪ thinner than spline
74 hold off;
75
76 % Enlarge axis and legend fonts
77 ax = gca; % Current axes
78 ax.FontSize = 14; % Increase font size for axis ticks
79 xlabel('Diferencia de potencial entre cilindros (V)', 'FontSize', 16);
    ↪ % Increase font size for x-axis label
80 ylabel('Corriente (nA)', 'FontSize', 16); % Increase font size for y-
    ↪ axis label
81 title('-5kV 3 m/s 51% 22\textdegree C E007', 'FontSize', 16); %
    ↪ Increase font size for title
82
83 % Adjust legend
84 lgd = legend({'data', 'Smoothing Spline', 'Downsampling'}, 'Location',
    ↪ 'southeast');
85 lgd.FontSize = 14; % Increase legend font size
86
87 % Adjust tick marks
88 last_data_point = a;
```

```
89 rounded_last_point = ceil(last_data_point / 200) * 200;
90 ax.XTick = 0:200:rounded_last_point; % Set X-ticks
91 ax.YTick = get(ax, 'YTick'); % Keep Y-ticks as they are
92 ax.XTickLabel = num2str(-(0:200:rounded_last_point)'); % Set X-tick
    ↪ labels
93 xlim(ax, [0, last_data_point+100]);
94
95 min_I2 = min(I2); % Find the minimum value
96 max_I2 = max(I2); % Find the maximum value
97 % Round the minimum down and the maximum up to the nearest interval
98 interval = 5; % For example, round to the nearest 10 units
99 rounded_min = floor(min_I2 / interval) * interval;
100 rounded_max = ceil(max_I2 / interval) * interval;
101 ax.YTickLabel = num2str(-(rounded_min:5:rounded_max)'); % Set Y-tick
    ↪ labels
102 ylim(ax, [rounded_min, rounded_max - 0]);
103
104 % Adjust figure margins
105 ti = ax.TightInset;
106 set(ax, 'Position', [ti(1), ti(2), 1 - ti(3) - ti(1), 1 - ti(4) - ti(2)
    ↪ - 0.01]);
107
108 % Ensure the figure window is updated before saving
109 drawnow;
110
111 % Saving the figure with the base file name
112 fig = gcf; % Get the current figure reference again if there was any
    ↪ issue
```

```
113 file_name = [baseFileName, 'Fit'];
114 print(fig, file_name, '-dpng', '-r300'); % Save the current figure as a
    ↪ PNG file
115
116 % Access coefficients of spline for further use
117 coefs = pp.coefs;
118
119 % Display mumax and mumin
120 fprintf('Ymin = %f\\n', rounded_min);
121 fprintf('Ymax = %f\\n', rounded_max);
```

D.2. Código para calcular el espectro de movilidades

Basado en el trabajo de Xiaoqian Ma y colaboradores [14]. Este código en MATLAB está diseñado para procesar y analizar datos experimentales de movilidad iónica y densidad de iones a partir de mediciones de voltaje y corriente. El presente código se puede encontrar en el siguiente repositorio de [GitHub](#).

```
1 %% Clear Workspace and Figures
2 clear variables; % Clears all variables from the workspace
3 close all; % Closes all open figures
4 clc; % Clears the command window
5
6 %% Constants Initialization
7 % These constants are used throughout the calculations
8 innerRadius = 0.009; % Inner radius of the cylinder in meters
9 outerRadius = 0.052; % Outer radius of the cylinder in meters
10 lengthCylinder = 0.33; % Length of the cylinder in meters
11 airVelocity = 3; % Air velocity in meters per second
12 electronCharge = 1.609e-19; % Charge of an electron in Coulombs
```



```
13 viscosity = 1.81e-5; % Air viscosity in Pascal-seconds
14 m_to_cm = 1e4; % Conversion factor from meters squared to centimeters
    ↪ squared
15
16 %% File Paths and Names
17 % Specify the paths and names of the files containing the data to be
    ↪ analyzed
18 excelFileName = 'GedienDataBase.xlsx'; % Excel file name for output
19 excelSheetName = 'NegIon'; % Specific sheet name in the Excel file for
    ↪ output
20 dataFileName = 'ElectrometerNeg_007downsample.dat'; % Data file name
    ↪ for input
21 dataFilePath = fullfile('C:\Users\YourUser\Documents\YourDirectory\
    ↪ Subfolder\', dataFileName); % Full path to the data file
22
23 %% Data Loading
24 % Load the experimental data from the specified file
25 data = importdata(dataFilePath); % Load data
26 voltage = data(:, 1); % Extract voltage data (V)
27 current = data(:, 2); % Extract current data (A)
28
29 %% Calculations
30 % Calculation of mobility based on air velocity, cylinder dimensions,
    ↪ and voltage
31 mobility = m_to_cm * (airVelocity * (outerRadius^2 - innerRadius^2) *
    ↪ log(outerRadius/innerRadius) ./ (2 * lengthCylinder * voltage));
32 % Differences in current and voltage for subsequent calculations
33 currentDiff = diff(1e-9*current); % Convert current to Amperes and
```

```
    ↪ calculate differences
34 voltageDiff = diff(voltage); % Calculate differences in voltage
35
36 %% Curve Fitting and Derivatives
37 % Fit a polynomial to the current-voltage data and calculate
    ↪ derivatives
38 p = polyfit(voltage, current, 3); % Fit a 3rd degree polynomial to the
    ↪ I-V data
39 p_first_derivative = polyder(p); % First derivative of the polynomial
40 p_second_derivative = polyder(p_first_derivative); % Second derivative
    ↪ of the polynomial
41 first_derivative = polyval(p_first_derivative, voltage); % Evaluate the
    ↪ first derivative at each voltage point
42 second_derivative = polyval(p_second_derivative, voltage); % Evaluate
    ↪ the second derivative at each voltage point
43 % Plot first and second derivatives
44 figure;
45 subplot(2, 1, 1);
46 plot(voltage, first_derivative);
47 title('First Derivative');
48 grid on;
49 subplot(2, 1, 2);
50 plot(voltage, second_derivative);
51 title('Second Derivative');
52 grid on;
53
54 %% Find mumax and mumin based on derivative criteria
55 indexMaxMobility = find(second_derivative < 0, 1, 'first');
```

```

56 indexMinMobility = find(first_derivative < 0, 1, 'first');
57 if isempty(indexMaxMobility) || isempty(indexMinMobility)
58     fprintf('Conditions for mumax and mumin not met within data range.\\
           ↪ n');
59     return;
60 end
61 minVoltage = voltage(indexMaxMobility);
62 maxVoltage = voltage(indexMinMobility);
63
64 %% Ion Density Calculation
65 % Calculate ion density between the determined maximum and minimum
           ↪ mobility indices
66 ionDensity = zeros(length(voltage), 1);
67 for idx = indexMaxMobility:indexMinMobility
68     if idx == indexMinMobility
69         ionDensity(idx) = (voltage(idx) / (electronCharge * airVelocity
           ↪ * pi * (outerRadius^2 - innerRadius^2))) * (currentDiff(
           ↪ idx-1) / voltageDiff(idx-1));
70     else
71         ionDensity(idx) = (voltage(idx) / (electronCharge * airVelocity
           ↪ * pi * (outerRadius^2 - innerRadius^2))) * (currentDiff(
           ↪ idx-1) / voltageDiff(idx-1) - currentDiff(idx) /
           ↪ voltageDiff(idx));
72     end
73 end
74
75 %% Mean Mobility and Voltage Calculations
76 % Calculate mean mobility, weighted mean mobility, mean voltage, and

```

D. CÓDIGOS DE PROGRAMACIÓN EN MATLAB

```
    ↪ mean radius
77 meanMobility = mean(mobility(indexMaxMobility:indexMinMobility));
78 weightedMeanMobility = dot(ionDensity(indexMaxMobility:indexMinMobility
    ↪ ), mobility(indexMaxMobility:indexMinMobility)) / sum(ionDensity(
    ↪ indexMaxMobility:indexMinMobility));
79 meanVoltage = m_to_cm * (airVelocity * (outerRadius^2 - innerRadius^2)
    ↪ * log(outerRadius/innerRadius) / (2 * lengthCylinder *
    ↪ weightedMeanMobility));
80
81 %% Bin Calculation for Mobility Spectrum
82 % Define bins and calculate sums for ion density in each bin
83 numBins = 7;
84 minMobility = min(mobility(indexMaxMobility:indexMinMobility));
85 maxMobility = max(mobility(indexMaxMobility:indexMinMobility));
86 binEdges = linspace(minMobility, maxMobility, numBins + 1);
87 binSums = zeros(1, numBins);
88 for i = 1:numBins
89     binRange = mobility >= binEdges(i) & mobility < binEdges(i + 1);
90     binSums(i) = sum(ionDensity(binRange));
91 end
92 maxBinSum = max(binSums); % Find the maximum bin sum
93 sumBinSums = sum(binSums); % Calculate the total sum of bin sums
94 meanBinSums = mean(binSums); % Calculate the mean of bin sums
95
96 %% Extract Plot Title Number from Data File Name
97 % Extract a number from the data file name for use in plotting titles
98 extractedNumber = regexp(dataFileName, '_(\d+)downsample', 'tokens');
99 if ~isempty(extractedNumber)
```

```
100     numberStr = extractedNumber{1}{1}; % This extracts the number as a
        ↳ string
101     plotTitleNumber = ['E', numberStr]; % Prepend 'N' to the number for
        ↳ the plot title
102 else
103     plotTitleNumber = 'E'; % Default value if the pattern is not found
104 end
105
106 %% Plotting and saving graph
107 % Create plots for visualization of results
108 plotVoltageCurrent(voltage, current); % Plot of current vs. voltage
109 plotIonMobilityBar(mobility, binEdges, binSums, minMobility,
        ↳ maxMobility, plotTitleNumber); % Absolute values of ion mobility
        ↳ spectrum
110 set(gcf, 'Position', [400, 200, 777, 555]); % Set figure position and
        ↳ size
111 % Adjust figure layout to accommodate axes before saving
112 adjustFigureLayout(gca, 0.01, 0.01); % additional_space_top, additional
        ↳ _space_right
113 [~, name, ~] = fileparts(dataFileName); % Separate the file name from
        ↳ its extension
114 imageFileName = ['Mov', name, '.png']; % Create a new file name for the
        ↳ image
115 saveas(gcf, imageFileName); % Save figure
116
117 %% Writing Results to Excel
118 % Check for existing data matching plotTitleNumber and update
        ↳ accordingly
```

D. CÓDIGOS DE PROGRAMACIÓN EN MATLAB

```
119 raw = readcell(excelFileName, 'Sheet', excelSheetName); % Read the
    ↪ sheet
120 existingTitles = raw(:,1); % Extract existing titles
121 rowIndex = find(strcmp(existingTitles, plotTitleNumber)); % Find row
    ↪ index for current data
122 if isempty(rowIndex)
123     disp('plotTitleNumber not found in Excel file.');
```

```
124     return;
125 else
126     dataToWrite = [weightedMeanMobility, meanVoltage, maxBinSum,
    ↪ sumBinSums, meanBinSums];
127     for i = 1:length(dataToWrite)
128         writecell({dataToWrite(i)}, excelFileName, 'Sheet',
    ↪ excelSheetName, 'Range', [char(65+i) num2str(rowIndex)]);
129     end
130
131     % Now, write the mobility values for indexMaxMobility and
    ↪ indexMinMobility
132     % Assuming the next columns after the last entry in dataToWrite are
    ↪ G and H
133     writecell({mobility(indexMinMobility)}, excelFileName, 'Sheet',
    ↪ excelSheetName, 'Range', ['G' num2str(rowIndex)]);
134     writecell({mobility(indexMaxMobility)}, excelFileName, 'Sheet',
    ↪ excelSheetName, 'Range', ['H' num2str(rowIndex)]);
135 end
136
137 %% Display Results in Command Window
138 % Output key results to the command window for quick reference
```

```
139 fprintf('Maximum Mobility = %f\n', mobility(indexMaxMobility));
140 fprintf('Minimum Mobility = %f\n', mobility(indexMinMobility));
141 fprintf('Mean Mobility = %f\n', meanMobility);
142 fprintf('Weighted Mean Mobility = %f\n', weightedMeanMobility);
143 fprintf('Mean Voltage = %f\n', meanVoltage);
144 fprintf('Mean Radius = %f\n', meanRadius);
145 fprintf('Min Voltage = %f\n', minVoltage);
146 fprintf('Max Voltage = %f\n', maxVoltage);
147
148 %% Functions Definition Section
149 % Define all functions used for plotting at the end for better
    ↪ organization
150
151 function plotVoltageCurrent(voltage, current)
152     % Function to plot voltage against current
153     figure;
154     plot(voltage, current, '-o');
155     xlabel('Voltage (V)');
156     ylabel('Current (nA)');
157     title('I-V Characteristics');
158     grid on;
159 end
160
161 function plotIonMobilityBar(~, binEdges, BinSums, minMobility,
    ↪ maxMobility, plotTitleNumber)
162     figure;
163     bar(binEdges(1:end-1), BinSums, 'histc');
164     set(gca, 'FontSize', 14); %set(gca, 'XScale', 'log'); % Set x-axis
```

D. CÓDIGOS DE PROGRAMACIÓN EN MATLAB

```
    ↪ to logarithmic scale
165 xlim(gca, [floor(minMobility*50)/50 - 0.02,ceil(maxMobility*20)/20 +
    ↪ 0]);
166 xlabel('Movilidad de iones (cm2 V-1 s-1)', 'FontSize',
    ↪ 17, 'Interpreter', 'latex');
167 ylabel('Densidad de iones (m-3)', 'FontSize', 17, 'Interpreter'
    ↪ , 'latex');
168 title(['Espectro de Movilidad I\'onica archivo ', plotTitleNumber],
    ↪ 'FontSize', 16, 'FontWeight', 'bold');
169 grid on;
170 end
171
172 function adjustFigureLayout(ax, additionalSpaceTop,
    ↪ additionalSpaceRight)
173 % Adjust figure layout to optimize space usage
174 drawnow; % Ensure the figure is fully rendered
175 ti = get(ax, 'TightInset'); % Get the tight inset values
176 set(ax, 'Position', [ti(1) + 0.005, ti(2) + 0.005, 1 - ti(3) - ti(1)
    ↪ - additionalSpaceRight, 1 - ti(4) - ti(2) -
    ↪ additionalSpaceTop]);
177 end
```


Bibliografía

- [1] J Alan Chalmers. *Atmospheric Electricity: International Series of Monographs in Natural Philosophy*, volume 11. Elsevier, 1967. URL <https://doi.org/10.1016/C2013-0-05473-4>. 2, 74, 78, 82
- [2] Richard C Flagan. History of electrical aerosol measurements. *Aerosol science and technology*, 28(4):301–380, 1998. URL <https://doi.org/10.1080/02786829808965530>. 2, 75
- [3] H Gerdien. Ein neuer Apparat zur Messung der elektrischen Leitfähigkeit der Luft. *Nachrichten von der Gesellschaft der Wissenschaften zu Göttingen, Mathematisch-Physikalische Klasse*, 1905:240–251, 1905. URL <http://dml.mathdoc.fr/item/GDZPPN002500450>. 2
- [4] Hans Gerdien. Die absolute messung der specifischen leitfähigkeit und der dichte des verticalen leitungsstromes in der atmosphäre. *Terrestrial Magnetism and Atmospheric Electricity*, 10(2):65–74, 1905. URL <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/TE010i002p00065>. 2
- [5] Samuel C Coroniti. Airborne conductivity meter. *Geofisica pura e applicata*, 47:79–83, 1960. URL <https://doi.org/10.1007/BF01992485>. 3
- [6] OH Gish and GR Wait. Thunderstorms and the earth’s general electrification. *Journal of Geophysical Research*, 55(4):473–484, 1950. URL <https://doi.org/10.1029/JZ055i004p00473>. 3
- [7] Rita C Callahan, SC Coroniti, AJ Parziale, and R Patten. Electrical conductivity of air in the troposphere. *Journal of Geophysical Research*, 56(4):545–551, 1951. URL <https://doi.org/10.1029/JZ056i004p00545>. 3
- [8] Albert Wigand. Measurements of the electrical conductivity in the free atmosphere up to 9,000 meters in height. *Terrestrial Magnetism and Atmospheric Electricity*, 19(2):93–101, 1914. URL <https://doi.org/10.1029/TE019i002p00093>. 3

- [9] OH Gish and KL Sherman. Meteorological features indicated by air-conductivity measurements made on flight of explorer ii. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 17(1):152–156, 1936. URL <https://doi.org/10.1029/TR017i001p00152>. 3
- [10] Karen Louise Aplin. *Instrumentation for Atmospheric Ion Measurements*. PhD thesis, The University of Reading, England, 2000. 3, 18, 21, 22, 24
- [11] Urmas Hõrrak. *Development of Gerdien Condenser for Atmospheric Pressure Plasmas*. PhD thesis, Tartu University, Estonia, 2001.
- [12] Zdeněk Roubal. *Nízkoúrovňová Měření*. PhD thesis, Brno University Of Technology, Czech Republic, 2015.
- [13] Ma Camille Corrales Lacdan. *Development of Gerdien Condenser for Atmospheric Pressure Plasmas*. PhD thesis, Doshisha University, Japan, 2017.
- [14] Xiaoqian Ma, Kun He, Li Xie, Yong Ju, Jiayu Lu, and Luxing Zhao. Calculation method of ion mobility spectrum for single-measurement-electrode gerdien tubes. *IET Science, Measurement & Technology*, 12(4):461–466, 2018. URL <https://doi.org/10.1049/iet-smt.2017.0221>.
- [15] R.G. Harrison K.L. Aplin. *ELECTRICITY IN THE ATMOSPHERE / Ions in the Atmosphere*. Academic Press, Oxford, second edition edition, 2015. ISBN 978-0-12-382225-3. URL <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-382225-3.00145-6>.
- [16] Daniel J Jacob. *Introduction to atmospheric chemistry*. Princeton university press, 1999.
- [17] John H Seinfeld and Spyros N Pandis. *Atmospheric chemistry and physics: from air pollution to climate change*. John Wiley & Sons, 2016.
- [18] AF Bouwman, DS Lee, Willem AH Asman, FJ Dentener, KW Van Der Hoek, and JGJ Olivier. A global high-resolution emission inventory for ammonia. *Global biogeochemical cycles*, 11(4):561–587, 1997.
- [19] Hannes Tammet. Size and mobility of nanometer particles, clusters and ions. *Journal of Aerosol Science*, 26(3):459–475, 1995. URL [https://doi.org/10.1016/0021-8502\(94\)00121-E](https://doi.org/10.1016/0021-8502(94)00121-E).
- [20] Urmas Hõrrak, Aadu Mirme, Jaan Salm, Eduard Tamm, and Hannes Tammet. Air ion measurements as a source of information about atmospheric aerosols. *Atmospheric Research*, 46(3-4):233–242, 1998. URL [https://doi.org/10.1016/S0169-8095\(97\)00065-3](https://doi.org/10.1016/S0169-8095(97)00065-3).

-
- [21] Shu-Ye Jiang, Ali Ma, and Srinivasan Ramachandran. Negative air ions and their effects on human health and air quality improvement. *International journal of molecular sciences*, 19(10):2966, 2018. URL <https://doi.org/10.3390/ijms19102966>.
- [22] Jingguo Qu, Minjun Zeng, Dewei Zhang, Dakai Yang, Xiongwei Wu, Qinlong Ren, and Jianfei Zhang. A review on recent advances and challenges of ionic wind produced by corona discharges with practical applications. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 55(15):153002, dec 2021. doi: 10.1088/1361-6463/ac3e2c. URL <https://doi.org/10.1088/1361-6463/ac3e2c>.
- [23] Kenkichi Nagato, Yasunori Matsui, Takahiro Miyata, and Toshiyuki Yamauchi. An analysis of the evolution of negative ions produced by a corona ionizer in air. *International journal of mass spectrometry*, 248(3):142–147, 2006. URL <https://doi.org/10.1016/j.ijms.2005.12.001>.
- [24] Michal Stano, Eugene Safonov, Marek Kucera, and Stefan Matejčík. Ion mobility spectrometry study of negative corona discharge in oxygen/nitrogen mixtures. *Chemická listy*, 102(16):1414–1417, 2008. URL http://www.chemicke-listy.cz/docs/full/2008_s4_s1414-s1417.pdf.
- [25] Fraser Daniel, Naim Hossain Patoary, Arden L Moore, Leland Weiss, and Adarsh D Radadia. Temperature-dependent electrical resistance of conductive polylactic acid filament for fused deposition modeling. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 99:1215–1224, 2018. URL <https://doi.org/10.1007/s00170-018-2490-z>.
- [26] N L Allen and Y Teisseyre. Characteristics of the gardien ion counter in the presence of a significant unipolar space charge. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 16(12):2485, dec 1983. URL <https://dx.doi.org/10.1088/0022-3727/16/12/025>.
- [27] Virgínia C Rufino and Josefredo R Pliego Jr. Single-ion solvation free energy: A new cluster–continuum approach based on the cluster expansion method. *Physical Chemistry Chemical Physics*, 23(47):26902–26910, 2021. URL <https://doi.org/10.1039/D1CP03517G>.
- [28] Casey P Kelly, Christopher J Cramer, and Donald G Truhlar. Aqueous solvation free energies of ions and ion- water clusters based on an accurate value for the absolute aqueous solvation free energy of the proton. *The Journal of Physical Chemistry B*, 110(32):16066–16081, 2006. URL <https://doi.org/10.1021/jp063552y>.
- [29] Song Hi Lee and Jayendran C Rasaiah. Proton transfer and the mobilities of the h+ and oh- ions from studies of a dissociating model for water. *The Journal of chemical physics*, 135(12), 2011. URL <https://doi.org/10.1063/1.3632990>.
-

- [30] Richard P Feynman, Robert B Leighton, and Matthew Sands. *The Feynman Lectures on Physics, Vol. II The New Millennium Edition Mainly Electromagnetism and Matter*, volume 2. Basic books, 2011.
- [31] Hui Wang, Bing Wang, Xiang Niu, Qingfeng Song, Mingwen Li, Yuanyuan Luo, Lidong Liang, Pengfei Du, and Wei Peng. Study on the change of negative air ion concentration and its influencing factors at different spatio-temporal scales. *Global Ecology and Conservation*, 23:e01008, 2020.
- [32] Allen, Charles L and Taylor, Allen R. Negative ion generator using an ultraviolet source to irradiate electrically conductive material, apr -7"1964. URL: <https://patents.google.com/patent/US3128378A/en>.
- [33] Alexander, Dominik D and Bailey, William H and Perez, Vanessa and Mitchell, Meghan E and Su, Steave. Air ions and respiratory function outcomes: a comprehensive review. *Journal of negative results in biomedicine*, 12(1):14, 2013. URL: <https://link.springer.com/article/10.1186/1477-5751-12-14>.
- [34] Iwama, H. Negative air ions created by water shearing improve erythrocyte deformability and aerobic metabolism. *Indoor Air*, 14(4):293–297, 2004. URL: http://www.cytothesis.us/3.0/NAI_Erythrocyte-Eformability_Aerobic-Metabolism.pdf.
- [35] Alejandro Ramírez-Solís, Jacques Vigué, Guillermo Hinojosa, and Humberto Saint-Martin. Solving the CH_4^- riddle: The fundamental role of spin to explain metastable anionic methane. *Phys. Rev. Lett.*, 124:056001, Feb 2020. URL <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.124.056001>.
- [36] Víctor M. Cruz-Atienza et al. Short-term interaction between silent and devastating earthquakes in Mexico. *Nature communications*, 12(1):1–14, 2021. URL <https://doi.org/10.1038/s41467-021-22326-6>.
- [37] Z. Roubal, Z. Szabó, W. Straka, P. Dohnal, and T. Hejtmánek. Experience with the design of an air ionization monitoring station for earthquake prediction. pages 230–237, 2020. URL <https://doi.org/10.1109/PIERS53385.2021.9695117>.
- [38] Andrew A. Tronin. Satellite remote sensing in seismology. a review. *Remote Sensing*, 2(1):124–150, 2010. ISSN 2072-4292. URL <https://doi.org/10.3390/rs2010124>.
- [39] Sheldon Warden, Tom Bleier, and Karl Kappler. Long term air ion monitoring in search of pre-earthquake signals. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 186:47–60, 2019. ISSN 1364-6826. URL <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2019.01.009>.
- [40] World Health Organization. Global Tuberculosis Report, 2016. URL http://www.who.int/tb/publications/global_report/en/.

-
- [41] Davies, Julian and Davies, Dorothy. Origins and Evolution of Antibiotic Resistance. *Microbiology and Molecular Biology Reviews*, 74(3):417–433, 2010. ISSN 1092-2172. URL <https://doi.org/10.1128/MMBR.00016-10>.
- [42] Vineet D. Menachery et al. A SARS-like cluster of circulating bat coronaviruses shows potential for human emergence. *Nature Medicine*, 21(12):1508–1513, 2015. URL <https://doi.org/10.1038/nm.3985>.
- [43] TED Talks. The next outbreak? We’re not ready - Bill Gates [Video], 2015. URL https://youtu.be/6Af6b_wyiWI.
- [44] Dirk Roos. Oxidative killing of microorganisms by phagocytic cells. *Trends in Biochemical Sciences*, 2(3):61 – 64, 1977. ISSN 0968-0004. URL [https://doi.org/10.1016/0968-0004\(77\)90132-3](https://doi.org/10.1016/0968-0004(77)90132-3).
- [45] Hawkins, LH and Barker, T. Air ions and human performance. *Ergonomics*, 21(4):273–278, 1978. URL <https://doi.org/10.1080/00140137808931724>.
- [46] Diamond et al., Marian C. Environmental Influences on Serotonin and Cyclic Nucleotides in Rat Cerebral Cortex. *Science*, 210(4470):652–654, 1980. URL <https://doi.org/10.1126/science.6254145>.
- [47] Ju, K and Kubo, T. Power spectral analysis of autonomic nervous activity in spontaneously hypertensive rats. *Biomedical sciences instrumentation*, 33:338–343, 1997. URL: <https://europepmc.org/article/med/9731382>.
- [48] Ryushi, Tomoo and Kita, Ichirou and Sakurai, Tomonobu and Yasumatsu, Miki-nobu and Isokawa, Masanori and Aihara, Yasutugu and Hama, Kotaro. The effect of exposure to negative air ions on the recovery of physiological responses after moderate endurance exercise. *International journal of biometeorology*, 41(3):132–136, 1998. URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s004840050066>.
- [49] Hiroshi Iwama, Hiroshi Ohmizo, Setsuo Furuta, Satoshi Ohmori, Kazuhiro Watanabe, Toshikazu Kaneko, and Kazuo Tsutsumi. Inspired superoxide anions attenuate blood lactate concentrations in postoperative patients. *Critical care medicine*, 30(6):1246–1249, 2002. URL: https://journals.lww.com/ccmjournal/Abstract/2002/06000/Inspired_superoxide_anions_attenuate_blood_lactate.14.aspx.
- [50] Goel, Namni and Terman, Michael and Terman, Jiuan Su and Macchi, Mariana M and Stewart, Jonathan W. Controlled trial of bright light and negative air ions for chronic depression. *Psychological Medicine*, 35(7):945, 2005. URL: https://www.researchgate.net/profile/Michael_Terman/publication/7700755_Controlled_trial_of_bright_light_and_negative_air_ions_for_chronic_depression/links/0f31753a80bb5568c900000.pdf.
-

- [51] Roppei Yamada, Syunsuke Yanoma, Makoto Akaike, Akira Tsuburaya, Yukio Sugimasa, Shoji Takemiya, Hisahiko Motohashi, Yasushi Rino, Yoshinori Takanashi, and Toshio Imada. Water-generated negative air ions activate nk cell and inhibit carcinogenesis in mice. *Cancer letters*, 239(2):190–197, 2006. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0304383505007408>.
- [52] Sirota, TV and Safronova, VG and Amelina, AG and Mal'tseva, VN and Avkha-cheva, NV and Sofin, AD and Yanin, VA and Mubarakshina, EK and Romanova, LK and Novoselov, VI. The effect of negative air ions on the respiratory organs and blood. *Biophysics*, 53(5):457–462, 2008. URL: <https://link.springer.com/article/10.1134/S0006350908050242>.
- [53] Pino, Olimpia and La Ragione, Francesco. There's something in the air: Empirical evidence for the effects of negative air ions (NAI) on psychophysiological state and performance. *Res. Psychol. Behav. Sci*, 1:48–53, 2013. URL: <http://www.sciepub.com/RPBS/abstract/411>.
- [54] Wiszniewski, Andrzej and Suchanowski, Andrzej and Wielgomas, Bartosz. Effects of Air-Ions on Human Circulatory Indicators. *Polish Journal of Environmental Studies*, 23(2), 2014. URL: <http://www.pjoes.com/Effects-of-Air-Ions-on-Human-Circulatory-r-nIndicators,89221,0,2.html>.
- [55] Wallner, Peter and Kundi, Michael and Panny, Michael and Tappler, Peter and Hutter, Hans-Peter. Exposure to air ions in indoor environments: Experimental study with healthy adults. *International journal of environmental research and public health*, 12(11):14301–14311, 2015. URL: <https://www.mdpi.com/1660-4601/12/11/14301>.
- [56] Bowers, Bonnie and Flory, Randall and Ametepe, Joseph and Staley, Lauren and Patrick, Anne and Carrington, Heather. Controlled trial evaluation of exposure duration to negative air ions for the treatment of seasonal affective disorder. *Psychiatry Research*, 259:7–14, 2018. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0165178116312124>.
- [57] Bailey, William H and Charry, Jonathan M. Acute exposure of rats to air ions: effects on the regional concentration and utilization of serotonin in brain. *Bioelectromagnetics: Journal of the Bioelectromagnetics Society, The Society for Physical Regulation in Biology and Medicine, The European Bioelectromagnetics Association*, 8(2):173–181, 1987. URL: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/2441706/>.
- [58] Watanabe, I and Noro, Hiroshi and Ohtsuka, Yoshinori and Mano, Yukio and Agishi, Yuko. Physical effects of negative air ions in a wet sauna. *International journal of biometeorology*, 40(2):107–112, 1997. URL: <https://link.springer.com/article/10.1007%2Fs004840050028>.

-
- [59] McDonald, RD and Bachman, CH and Lorenz, PJ. Some physiological effects of air ion treatment without ion inhalation. *International Journal of Biometeorology*, 9(2):141–147, 1965. URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/BF02188469>.
- [60] Hedge, A and Collis, MD. Do negative air ions affect human mood and performance? *The Annals of occupational hygiene*, 31(3):285–290, 1987. URL: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/3426028/>.
- [61] Reilly, T and Stevenson, IC. An investigation of the effects of negative air ions on responses to submaximal exercise at different times of day. *Journal of human ergology*, 22(1):1–9, 1993. URL: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/8064146/>.
- [62] Bailey, William H and Williams, Amy Lavin and Leonhard, Megan Jeanne. Exposure of laboratory animals to small air ions: a systematic review of biological and behavioral studies. *Biomedical engineering online*, 17(1):1–32, 2018. URL: <https://biomedical-engineering-online.biomedcentral.com/articles/10.1186/s12938-018-0499-z>.
- [63] Phillips, G and Harris, George J and Jones, Marian W. Effect of air ions on bacterial aerosols. *international Journal of Biometeorology*, 8(1):27–37, 1964. URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/BF02186925>.
- [64] Kellogg, EW and Yost, MG and Barthakur, N and Kreuger, AP. Superoxide involvement in the bactericidal effects of negative air ions on *Staphylococcus albus*. *Nature*, 281(5730):400–401, 1979. URL: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/225679/>.
- [65] Gabbay, Jacob and Bergerson, Orna and Levi, Nissim and Brenner, Shmuel and Eli, Ilana. Effect of ionization on microbial air pollution in the dental clinic. *Environmental research*, 52(1):99–106, 1990. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0013935105801549>.
- [66] Shargawi, JM and Theaker, ED and Drucker, DB and MacFarlane, T and Duxbury, AJ. Sensitivity of *Candida albicans* to negative air ion streams. *Journal of applied microbiology*, 87(6):889–897, 1999. URL: <https://sfamjournals.onlinelibrary.wiley.com/DOI/abs/10.1046/j.1365-2672.1999.00944.x>.
- [67] Seo, Kun Ho and Mitchell, BW and Holt, PS and Gast, RK. Bactericidal effects of negative air ions on airborne and surface *Salmonella enteritidis* from an artificially generated aerosol. *Journal of food protection*, 64(1):113–116, 2001. URL: <https://meridian.allenpress.com/jfp/article/64/1/113/169104/Bactericidal-Effects-of-Negative-Air-Ions-on>.
- [68] Noyce, JO and Hughes, JF. Bactericidal effects of negative and positive ions generated in nitrogen on *Escherichia coli*. *Journal of electrostatics*, 54(2):179–
-

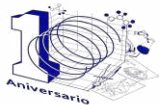
- 187, 2002. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0304388601001796>.
- [69] Fan, L and Song, J and Hildebrand, PD and Forney, CF. Interaction of ozone and negative air ions to control micro-organisms. *Journal of applied microbiology*, 93(1):144–148, 2002. URL: <https://sfamjournals.onlinelibrary.wiley.com/DOI/full/10.1046/j.1365-2672.2002.01683.x>.
- [70] Noyce, JO and Hughes, JF. Bactericidal effects of negative and positive ions generated in nitrogen on starved *Pseudomonas veronii*. *Journal of electrostatics*, 57(1):49–58, 2003. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0304388602001109>.
- [71] Kerr et al., Kevin G. Air ionisation and colonisation/infection with methicillin-resistant *Staphylococcus aureus* and *Acinetobacter* species in an intensive care unit. *Intensive care medicine*, 32(2):315–317, 2006. URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00134-005-0002-8>.
- [72] Fan, Xuotong and Fett, William F and Mitchell, Bailey W. Effect of negative air ions on *Escherichia coli* ATCC 25922 inoculated onto mung bean seed and apple fruit. *Journal of food protection*, 70(1):204–208, 2007. URL: <https://meridian.allenpress.com/jfp/article/70/1/204/171798/Effect-of-Negative-Air-Ions-on-Escherichia-coli>.
- [73] Fletcher, Louise A and Gaunt, Lindsey F and Beggs, Clive B and Shepherd, Simon J and Sleight, P Andrew and Noakes, Catherine J and Kerr, Kevin G. Bactericidal action of positive and negative ions in air. *BMC microbiology*, 7(1):32, 2007. URL: <https://link.springer.com/article/10.1186/1471-2180-7-32#citeas>.
- [74] Tyagi, Amit Kumar and Nirala, Bikesh Kumar and Malik, Anushree and Singh, Kamlesh. The effect of negative air ion exposure on *Escherichia coli* and *Pseudomonas fluorescens*. *Journal of Environmental Science and Health, Part A*, 43(7):694–699, 2008. URL: <https://www.tandfonline.com/DOI/abs/10.1080/10934520801959831>.
- [75] Escombe et al., A Roderick. Upper-room ultraviolet light and negative air ionization to prevent tuberculosis transmission. *PLoS Med*, 6(3):e1000043, 2009. URL: <https://journals.plos.org/plosmedicine/article?id=10.1371/journal.pmed.1000043>.
- [76] Kampmann, Y and Klingshirn, A and Kloft, K and Kreyenschmidt, J. The application of ionizers in domestic refrigerators for reduction in airborne and surface bacteria. *Journal of applied microbiology*, 107(6):1789–1798, 2009. URL: <https://sfamjournals.onlinelibrary.wiley.com/DOI/full/10.1111/j.1365-2672.2009.04359.x>.

-
- [77] Tyagi, AK and Malik, A. Antimicrobial action of essential oil vapours and negative air ions against *Pseudomonas fluorescens*. *International journal of food microbiology*, 143(3):205–210, 2010. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0168160510004952>.
- [78] Dobrynin, Danil and Friedman, Gary and Fridman, Alexander and Starikovskiy, Andrey. Inactivation of bacteria using dc corona discharge: role of ions and humidity. *New journal of physics*, 13(10):103033, 2011. URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1367-2630/13/10/103033/meta>.
- [79] Timoshkin et al., Igor V. Bactericidal effect of corona discharges in atmospheric air. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 40(10):2322–2333, 2012. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/6192349>.
- [80] Zhou, Pei and Yang, Yi and Huang, Gongsheng and Lai, Alvin CK. Numerical and experimental study on airborne disinfection by negative ions in air duct flow. *Building and Environment*, 127:204–210, 2018. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360132317305139>.
- [81] Pratt, Robertson and Barnard, Robert W. Some effects of ionized air on *Penicillium notatum*. *Journal of the American Pharmaceutical Association*, 49(10):643–646, 1960. URL: <https://onlinelibrary.wiley.com/DOI/abs/10.1002/jps.3030491004>.
- [82] Mitchell, Bailey W and King, Daniel J. Effect of negative air ionization on airborne transmission of Newcastle disease virus. *Avian diseases*, pages 725–732, 1994. URL: https://www.jstor.org/stable/1592107?seq=1#metadata_info_tab_contents.
- [83] Krueger, Albert P and Kotaka, Sadao and Andriese, Paul C and with the technical assistance of Eddie J. Reed. Studies on the Effects of Gaseous Ions on Plant Growth: I. The influence of positive and negative air ions on the growth of *Avena sativa*. *The journal of general physiology*, 45(5):879–895, 1962. URL: <https://rupress.org/jgp/article/45/5/879/30586/Studies-on-the-Effects-of-Gaseous-Ions-on-Plant>.
- [84] Krueger, Albert P and Kotaka, Sadao and Andriese, Paul C. Some observations on the physiological effects of gaseous ions. *International Journal of Biometeorology*, 6(1):33–48, 1962. URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/BF02187011>.
- [85] Kotaka et al., Sadao. Air ion effects on the oxygen consumption of barley seedlings. *Nature*, 208(5015):1112–1113, 1965. URL: <https://www.nature.com/articles/2081112a0>.
-

- [86] Elkiey, TM and Bhartendu, S and Barthakur, N. Air ion effect on respiration and photosynthesis of barley and *Antirrhinum majus*. *International journal of biometeorology*, 29(3):285–292, 1985. URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/BF02189659>.
- [87] Barthakur, NN and Arnold, NP. Growth and certain chemical constituents of tobacco plants exposed to air ions. *International journal of biometeorology*, 32(2):78–80, 1988. URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/BF02189659>.
- [88] Song, Min-Jeong and Kang, Tae-Hwan and Han, Chung-Su and Oh, Myung-Min. Air anions enhance lettuce growth in plant factories. *Horticulture, Environment, and Biotechnology*, 55(4):293–298, 2014. URL: <https://link.springer.com/article/10.1007%2Fs13580-014-1016-3>.
- [89] Song, Min-Jeong and Jeon, Yu-Min and Oh, Myung-Min. Growth of and bacterial counts on several edible sprouts exposed to spray ionization. *Protected Horticulture and Plant Factory*, 24(1):45–50, 2015. URL: https://www.researchgate.net/profile/Myung_Min_Oh/publication/276179565_Growth_of_and_Bacterial_Counts_on_Several_Edible_Sprouts_Exposed_to_Spray_Ionization/links/55c88d4808aeb97567474fd4.pdf.
- [90] Lee, So-Ra and Kang, Tae-Hwan and Han, Chung-Su and Oh, Myung-Min. Air anions improve growth and mineral content of kale in plant factories. *Horticulture, Environment, and Biotechnology*, 56(4):462–471, 2015. URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s13580-015-0035-z>.



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL
ESTADO DE MORELOS



Instituto de
Investigación en
Ciencias
Básicas y
Aplicadas



INSTITUTO DE INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS BÁSICAS Y APLICADAS

POSGRADO EN CIENCIAS

Cuernavaca, Mor., a 3 de mayo de 2024

DRA. LINA ANDREA RIVILLAS ACEVEDO COORDINADORA DEL POSGRADO EN CIENCIAS

Presente

Atendiendo a la solicitud para emitir DICTAMEN sobre la revisión de la tesis titulada: Caracterización y Medición de Iones Negativos Atmosféricos Mediante el Condensador Cilíndrico de Gerdien, que presenta el alumno **L. en C. Antonio Lira Verduzco** (10036972) para obtener el título de Maestro en Ciencias.

Director de tesis: Dr. Guillermo Guadalupe Hinojosa Aguirre
Unidad Académica: Instituto de Investigación en Ciencias Básicas y Aplicadas (IICBA)

Nos permitimos informarle que nuestro voto es:

NOMBRE	DICTAMEN	FIRMA
Dr. Ramón Hernández Lamonedá CIQ - UAEM	APROBADO	
Dr. Alejandro Ramírez Solís CInC - UAEM	APROBADO	
Dr. Guillermo Guadalupe Hinojosa Aguirre ICF - UNAM	APROBADO	
Dr. Marco Antonio Rivera Islas CInC - UAEM	APROBADO	
Dr. Antonio Marcelo Juárez Reyes ICF - UNAM	APROBADO	





UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL
ESTADO DE MORELOS

Se expide el presente documento firmado electrónicamente de conformidad con el ACUERDO GENERAL PARA LA CONTINUIDAD DEL FUNCIONAMIENTO DE LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MORELOS DURANTE LA EMERGENCIA SANITARIA PROVOCADA POR EL VIRUS SARS-COV2 (COVID-19) emitido el 27 de abril del 2020.

El presente documento cuenta con la firma electrónica UAEM del funcionario universitario competente, amparada por un certificado vigente a la fecha de su elaboración y es válido de conformidad con los LINEAMIENTOS EN MATERIA DE FIRMA ELECTRÓNICA PARA LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE ESTADO DE MORELOS emitidos el 13 de noviembre del 2019 mediante circular No. 32.

Sello electrónico

GUILLERMO GUADALUPE HINOJOSA AGUIRRE | Fecha:2024-05-03 17:11:20 | FIRMANTE

YFYXoolKYhxOb6+s086QP9CfglefVZnFktNz/bmCvFzFe3dj7ZbUwidHPbmvy/zn7Y+hfs9wzndHRsa0dzZPLW+/MWkk+rQcB+Vlz9xAVDJWU+rTi1F1stUoctQdzSSika9quA8ux
Q6ic6D6PixSOJJ3/B3xGIFA7vYY3QzwPkTYWGLJGuGZikqINxHOVvPIZnVN+qUlw3OvrCC5ft2Oi7TV9XLLWY26Goe0iqfwwQJ2/5FDeIcKM+UdnLgO9jkDbl86g+XY2D8lu3Dg
DQA5tWmfrIKOJhjdB/ZBPzb9EdztUWBJuEDdchcVHg1YhtGD59nrrLQ8cGwdTQdrseBg==

ALEJANDRO RAMIREZ SOLIS | Fecha:2024-05-04 08:23:10 | FIRMANTE

SAJVEqcMegk5hmuXzn2j52y2oooxaUDXatF3ZZKedYAONpEw7JGL0T1VMY7dtDR9++GHXJhm11DUIM4VqAGd3eKJ5slQY4PvVHOLXXkQfSDgrMqauWPktpj3EEExZHIvVDF
egj0Qo88ZwJFSvjwYm7nlbpF1w/6eFDSf5n5nPFLigRDDZKblPA69XoaUbHzAbqnMYPsvt4B3/Ku8ign7CFVR6CGD976EccvwnQubhYdK3IASbCEk3IMh73m0r0sz3W6Pz2TDUu
prnfcBcTVL5Jc7ZnNKO8ewWjkrVBCjUJ9W3DO6I3PYIh/IQ/PNizjLayfv7y8dQgBTesf8xJ4A==

RAMON HERNANDEZ LAMONEDA | Fecha:2024-05-04 08:56:48 | FIRMANTE

iGPsvxhjizKvaY4g07CnBVY7sgfO4Jnab9ucYMekcn6OR9SEWro+C2yzQ3bQMkItxaPYtp5p/bXBrC2U7/igUHDR+4mpgJHscY0oL5Qd6M1I5laCEk+DQn6ebUtmf6+QOq3CJ
arH7zeXwpxkSs1cZkbrUIdWD7uocXjGprID367BSjQP7vBp+QjyjFjhY9XwTIsyKLFylxsqkclJ+M5K9nbN980Gv+cwOfu8yh2JTA5LzJPV4depkcAqvJMA+81pBuG0oFfof83JUIOTm
vS3oeKj+W6hngVppY+E7m7k/a79ytyG35CnzuiNxlakJLbkmZCXC+dEylr2QMYYnBQ==

ANTONIO MARCELO JUAREZ REYES | Fecha:2024-05-06 11:28:35 | FIRMANTE

Tcbci8T4k/4nWuHOMp2VmKTCNitqhMoE1+5WaYAuaq61tWaiV/I6Sj+zc5LwUwY077TMQ9qIK0lh830rlvlfHmh9yX7AeaOjLdzWijho7FMH55YwDgvARKqf82mmDOvn6Q9JTB8g
Z0Pb4/KiShF7jHalYjKg+qrYBpp3kZyZMD2D0q8DILLWOKOOSkp4ENOVcyHI5iXCAIQh2J0VPOgbVNcaZLWnspM5cPYBklLDDFTSPtwJ6zMdGbfEvs6E7KH/o3J1IW2J7oH/4h
CpigDXZwUMwhwgob4OcqJ9teTC28rcG3dpywQrW0jZmM5K6OeJDTKvRqYI4M0b+YqmWIRLQ==

MARCO ANTONIO RIVERA ISLAS | Fecha:2024-05-07 13:35:49 | FIRMANTE

PG3olwe3PvexjAmUzWVDUTQngsIVbmlidGik8ISdWOHukKs4Oe6AwleuxvgsEDudyA6GDExaJMIOFQoP4GFbl3Vtk7ZYNzW78JlaPauK8Rk5gsPhVale1C/XQwCStqGZuxGWp4
mlHLFRP1rwLh5dO+0zghgDFv+eScdDf1UmOGqlcKgN5MW/Z44d1fWqczXpeC+CKiF/i9jX3lsROMjyNVTmfEIMtb294CX9Ky/ow+4KZDHSTmn72MIMqkg6zTN+zEIJom5KDLI9
kc2BBdPRb+vUT/pl479LU4K9C6M9kKdAISggF5EvvCbXUJ94h/92Vy1AHc0tIFi30+uLqTeQ==

Puede verificar la autenticidad del documento en la siguiente dirección electrónica o
escaneando el código QR ingresando la siguiente clave:



ipuE1mB8X

<https://efirma.uaem.mx/noRepudio/O67e9EVrVQWRV2lh1iUJRhzAshTOjTLo>



UAEM
RECTORÍA
2023-2029