

UNIVERSIDAD CENTRAL "MARTA ABREU" DE LAS VILLAS
FACULTAD DE MATEMÁTICA, FÍSICA Y COMPUTACIÓN
DEPARTAMENTO DE FÍSICA



Trabajo de Diploma

Dinámica del Ozono bajo la influencia de
Eventos Transitorios Luminosos (TLE)

Daniel Barrios González

Santa Clara

2016

"Año 58 de la Revolución"

UNIVERSIDAD CENTRAL "MARTA ABREU" DE LAS VILLAS
FACULTAD DE MATEMÁTICA, FÍSICA Y COMPUTACIÓN
DEPARTAMENTO DE FÍSICA



Trabajo de Diploma

Dinámica del Ozono bajo la influencia de
Eventos Transitorios Luminosos (TLE)

Autor: Daniel Barrios González

Tutor: Dr.C. José Enrique Nieto Sánchez

Cotutor: Msc. Noel Pérez Días

Santa Clara

2016

"Año 58 de la Revolución"

Laboratorio de Ciencia Planetaria. Departamento de Física. Universidad Central Marta Abreu
De Las Villas. Carretera a Camajuaní km 5.5. nieto@uclv.edu.cu, dbgonzalez@uclv.cu.

DICTAMEN

El que subscribe, Daniel Barrios González, hago constar que el trabajo titulado “Dinámica del Ozono bajo la influencia de Eventos Transitorios Luminosos (TLE)” fue realizado en la Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas como parte de la culminación de los estudios de la especialidad Licenciatura en Física, autorizando a que el mismo sea utilizado por la institución, para los fines que estime conveniente, tanto de forma parcial como total y que además no podrá ser presentado en eventos ni publicado sin la autorización de la Universidad.

Firma del Autor

Los abajo firmantes, certificamos que el presente trabajo ha sido realizado según acuerdos de la dirección de nuestro centro y el mismo cumple con los requisitos que debe tener un trabajo de esta envergadura referido a la temática señalada.

Firma del Tutor

Dr.C. José Enrique Nieto Sánchez
Sánchez

Firma del Jefe de Seminario

Dr.C. Rolando Cárdenas Ortiz

Fecha

“Por más difícil que se nos presente una situación, nunca dejemos de buscar la salida, ni de luchar hasta el último momento. En momentos de crisis, sólo la imaginación es más importante que el conocimiento”.

Albert Einstein

Dedicatoria:

A mi familia, amigos y profesores....

Agradecimientos:

Le agradezco primeramente a mi familia la más genuina del mundo, que a estado para mí en todo momento, a mi MADRE, un ser que está orgullosa de mí donde quiera que esté. Así como mi abuela que forjo en mí los valores con que cuento, a mi tío que ha sido todo para mí y eres la persona más importante en mi vida, a ti Papi Hugo y a ustedes Tía Ide, Tía Belkys, Tía Leyanis, Tía Nancy y Tío Pedrito, Eliannis, Liz y Lisett, Aní y Pedro, Alejandro y Leandro. A todo que tienen un lugar especial en mi corazón Anguito, Anisbel, Robe, Chino, Isabel y ahora a Verónica a todos gracias.

Le agradezco a Dios por darme la familia que me dio, y además por hacerme privilegiado al escoger la familia que uno tiene la posibilidad de escoger: los amigos a todos y cada uno de ellos Katy, Kenya, Kiara, Yasly, Giselle, Alina, Norma, Raimel. Almeida, Manuel, Michel, Raúl, Osvaldo y Jorge. Por lo que me puedo considerar muy afortunado y a muchos otros que aunque no los menciono también son parte de mí corazón. Gracias a todos por ser mis hermanos.

Para realizar este Trabajo de Diploma hay personas que han sido imprescindibles como mi tutor José Enrique Nieto, quien siempre confió en mí, gracias.

Al profesor Fadragas quien me impulso hasta donde he llegado desde 2do año y siempre he podido contar con sus consejos, así como Waldo mi amigo, Noel, Mujica y Yanelis la mejor PG, Y los demás profesores del departamento y especialmente a los del Laboratorio de Ciencias Planetarias. A Monte, Sara y a ti Cari gracias. A todos gracias.

TAREA TÉCNICA

Crear un modelo para predecir los cambios que sufre la dinámica del ozono estratosférico bajo la influencia de eventos luminosos transitorios.

Firma del Autor

Firma del Tutor

RESUMEN

Los eventos luminosos transitorios (TLEs) son descargas eléctricas de origen diverso que dan lugar a diferentes tipos de plasmas débilmente ionizados entre las partes altas de las nubes de tormenta y la baja y alta estratosfera. El presente trabajo pretende tomar en consideración la acción de estos eventos naturales sobre la variedad alotrópica del oxígeno, que en forma de un escudo delgado que rodea nuestro planeta y nos protege de la dañina radiación ultravioleta que proviene del Sol: la capa de ozono. Esta pantalla de ozono tan importante se crea y se destruye mediante ciclos fotoquímicos dadas las propiedades del ozono y fue sugerido por vez primera por Sydney Chapman en 1929. El modelo que se propone se crea a partir de las ecuaciones cinéticas de las reacciones químicas del ciclo de Chapman del ozono y una ecuación de en la que intervienen los electrones dada por las reacciones especies oxigenadas que ocurren en los Sprites un tipo de TLEs y las reacciones de la ionización por impacto electrónico y la captura disociativa característica en los eventos luminosos transitorios.

Palabras claves: eventos luminosos transitorios, plasma, ozono, ionización.

ABSTRACT:

Transient Luminous Events (TLE) are electrical discharges from various sources that give rise to different types of weakly ionized plasmas between the tops of storm clouds and the lower and upper stratosphere. This paper aims to stimulate the action of natural events on the allotropic variety of oxygen as a thin shield around our planet and protects us from harmful ultraviolet radiation from the sun: the ozone layer. This screen so important ozone is created and destroyed by photochemical cycles given the properties of ozone and was first suggested by Sydney Chapman in 1929. The proposed model is created from the kinetic equations of the speed of reactions chemical cycle Chapman ozone and equation where electrons given by the reactions oxygenated species occurring in Sprites a type of TLEs and the reactions of electron impact ionization and dissociative capture feature in luminous events involved transient.

Keywords: transient luminous events, plasma, ozone, ionization.

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN.....	1
CAPÍTULO 1. MARCO TEÓRICO SOBRE A EVENTOS TRANSITORIOS LUMINOSOS EN LA ATMÓSFERA TERRESTRE Y SU ACCION EN EL OZONO ESTRATOSFÉRICO.....	5
1.1La Atmósfera Terrestre	5
1.2 Plasmas en la Atmósfera Terrestre	8
1.3 Eventos Luminosos Transitorios en la Atmósfera Terrestre.....	11
1.4 La electricidad en la Atmósfera: Los rayos.....	16
1.5 La Ionósfera	18
1.6 Ozono	20
1.6.1 Historia y Ozono en Estado Natural	20
1.6.2 Propiedades fisicoquímicas del Ozono e Importancia	22
1.7 Formación y descomposición del Ozono Estratosférico.	25
1.8 Ciclo de Chapman del ozono.....	30
CAPÍTULO 2. MATERIALES Y MÉTODOS.	32
2.1 Química-física del Ozono.....	32
2.2 Modelos para especies plasmáticas en las que intervienen electrones.....	34
2.2.1 Reacciones de especies oxigenadas que ocurren en los sprites en la que intervienen electrones.....	35
2.2.2 Reacciones químicas de la ionización por impacto electrónico y la captura disociativa característica en los eventos luminosos transitorios.	38
2.2.3 Cinética de las reacciones en que intervienen electrones para los TLEs.	40
2.3 Modelo General	41
CAPÍTULO 3. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS	43
3.1 Normalización de parámetros y variables del Modelo	44
3.2 Análisis dinámico del sistema.	47
3.3 Análisis de los resultados gráficos obtenidos.	48
Conclusiones:	53
Recomendaciones:.....	54
Referencias Bibliográficas:	55

INTRODUCCIÓN

Desde las primeras décadas del siglo XXI, la humanidad ha sido consciente de los irreversibles problemas medioambientales que nos afectan y de los desafíos que conlleva enmendar en alguna medida, el daño que el hombre ha causado a la atmósfera terrestre. En ocasiones estas acciones toman su protagonismo científico, cuando se es capaz de proponer soluciones que están por encima del poder del propio hombre. Lo que se logra aprendiendo a aprovechar al máximo, los existentes recursos naturales con los que todavía se cuenta, en función de proponer soluciones viables. Para lograr esto, es preciso realizar una correcta construcción de los conocimientos acerca del tema que nos ocupa y de las posibles soluciones que podemos promover. Este es el sentido del siguiente Trabajo de Diploma el cual intentará proponer la formación de conocimientos novedosos acerca de un tema de interés científico.

Uno de estos problemas medioambientales que acontecen, es sin lugar a dudas el que ocurre cada primavera austral en la Antártida, donde se abre un "**agujero**" en la capa de ozono, el cual ocurre como resultado de las condiciones especiales del tiempo durante el invierno polar en la baja estratosfera, donde usualmente las concentraciones de ozono son las más elevadas. La acción del hombre es sin lugar a dudas una de las causas de eventos como este. ¿Será capaz el hombre de enmendar sus propias acciones dañinas sobre el medio natural? ¿Existen recursos o fenómenos naturales que puedan mejorar la dañada dinámica del ozono estratosférico?

La situación problemática que motiva esta investigación, reside en la necesidad de conocer de qué forma se comporta el ozono estratosférico al tomar en consideración la acción que tienen sobre el fenómenos naturales como los eventos luminosos transitorios (TILEs) (Francisco José Gordillo Vázquez et al., 2011), que son descargas eléctricas de origen diverso que dan lugar a diferentes plasmas débilmente ionizados en la estratosfera. Por lo que se convierte en un interés para la comunidad científica comprobar si algún fenómeno natural de nuestra atmosfera planetaria, interviene significativamente en la dinámica que sigue el ozono estratosférico. Y este es precisamente el problema científico que da origen a esta investigación.

El objeto de esta investigación es la interacción de las concentraciones, las cargas y procesos asociados, y las reacciones que se registran en esas regiones atmosféricas.

La actualidad de esta tesis, reside en que dadas las diferentes teorías (aún en desarrollo) sobre el surgimiento de los eventos luminosos transitorios, los cuales pueden tener un origen no únicamente localizado en una sola región de la atmósfera terrestre (D. D. Sentman et al., 2008), es congruente aplicar las ecuaciones que describen su accionar a alturas donde es coherente hablar de las ecuaciones asociadas al ciclo de Chapman de formación y destrucción de ozono estratosférico. A fin de construir un modelo que abra el camino a tesis análogas posteriores que permitan su empleo y ampliación en caso de la verificación de una u otra teoría, o de la validez sostenida de más de una de las teorías actualmente en curso.

El problema científico que se plantea esta tesis, expresado mediante preguntas de carácter científico es el siguiente: ¿Cómo se comportan y qué información aportan las ecuaciones cinéticas de la velocidad de las reacciones químicas del ciclo de Chapman para el ozono y el oxígeno, así como la ecuación seleccionada en correspondencia con las presunciones teóricas objeto de estudio, asociadas a los sprites y a las reacciones de ionización por impacto electrónico, y la captura disociativa característica en los eventos luminosos transitorios? ¿Qué modelo coherente puede describir este comportamiento, y qué información aportan las soluciones a las ecuaciones diferenciales de este modelo para comprender cómo se comporta el ozono estratosférico, con la ocurrencia de eventos luminosos transitorios específicamente de sprites?

El objetivo general que se persigue es crear un modelo para predecir los cambios que sufre la dinámica del ozono estratosférico con la exposición a un evento luminoso transitorio, específicamente un sprite.

Además de establecer el posible vínculo de eventos luminosos transitorios con cambios en la dinámica de creación y destrucción, así como la concentración del ozono estratosférico, mediante el análisis físico-matemático. Este modelo se crea a partir de las ecuaciones cinéticas de la velocidad de las reacciones químicas del ciclo de Chapman para el ozono y el oxígeno y una ecuación para los electrones que intervienen en reacciones de especies oxigenadas, que ocurren en los sprites y

las reacciones de la ionización por impacto electrónico y la captura disociativa característica en los eventos luminosos transitorios. Como objetivo específico se plantea implementar computacionalmente dicho modelo, con la posibilidad de ajustar sus valores para casos más específicos, dentro de nuestra atmósfera terrestre en investigaciones futuras.

Para esto se parte de hipótesis que demuestren que los sprites, son un tipo de fenómeno de esta naturaleza, que tienen su origen a alturas comprendidas en las que aún se puede hablar de niveles significativos en la concentración de ozono estratosférico (Gordillo-Vázquez, 2008). La ocurrencia de fenómenos ópticos transitorios en la atmósfera superior provocados por un rayo en tormentas eléctricas como son los sprites, sugiere que estos deberían ocurrir acompañados de perturbaciones químicas locales dentro de las regiones de emisión óptica, asociado a aumentos en la concentración de electrones que reaccionan con las especies mayoritarias de la atmósfera. Definiendo como elementos a considerar el conjunto de ecuaciones cinéticas de la velocidad de las reacciones químicas del ciclo de Chapman para el ozono y el oxígeno, así como una ecuación en la que interviene electrones de especies oxigenadas que ocurren en los sprites, en el plano del posible vínculo con las reacciones de la ionización por impacto electrónico y la captura disociativa.

Este modelo tendrá veracidad en el entorno natural específico, que corresponde a la estratosfera, a alturas donde confluyen estos fenómenos y aún existe ozono en cantidades considerables. Por lo que se tomó un rango de alturas comprendidas entre los 30 y 40 kilómetros sobre la superficie terrestre para las que se determinaron los valores de constantes, parámetros y variables de las ecuaciones del modelo.

La investigación quedó estructurada en tres capítulos:

En el primero se definen los conceptos e ideas necesarias para proponer la teoría, que explica la fenomenología de los eventos luminosos transitorios, y su naturaleza plasmática. Además de las propiedades que tiene el ozono y los mecanismos que rigen su dinámica.

En el segundo capítulo se implementa la metodología para la creación del modelo.

El tercer capítulo se muestra los mecanismos numéricos, matemáticos y computacionales necesarios para la obtención de los resultados del modelo.

Finalmente se presentan las conclusiones y recomendaciones de la investigación.

CAPÍTULO 1. MARCO TEÓRICO SOBRE A EVENTOS TRANSITORIOS LUMINOSOS EN LA ATMÓSFERA TERRESTRE Y SU ACCION EN EL OZONO ESTRATOSFÉRICO.

En este capítulo se exponen un conjunto de conceptos básicos sobre los fenómenos que se encuentran en nuestra atmósfera planetaria, y comparten en común el estado de agregación plasmático. Así mismo, se estudia su posible influencia en las propiedades químicas y eléctricas de la atmósfera y especialmente de la pantalla que nos protege de los rayos ultravioletas provenientes del Sol: la capa de ozono. Estos eventos luminosos de origen eléctrico son fenómenos físicos cuyo origen está en las cargas eléctricas y cuya energía se manifiesta en fenómenos mecánicos, térmicos, luminosos y químicos, entre otros (Pereyra, 2009). Se puede observar de forma natural en fenómenos atmosféricos, por ejemplo los rayos y sus familias de eventos transitorios luminosos, que son descargas eléctricas producidas por la transferencia de energía entre la ionosfera u otra capa de la Atmósfera y la superficie terrestre. La superficie de la Tierra, la ionosfera, y la atmósfera se conocen como el “circuito eléctrico atmosférico global” (Pereyra, 2009).

También se intentará dar explicación a las propiedades químicas de la atmósfera y especialmente a especies como la variedad alotrópica del oxígeno, que en forma de una capa rodea nuestro planeta. Para ser capaces preparar las bases, con el fin de comprender de qué forma los fenómenos eléctricos antes mencionados influyen en la dinámica que tiene el ozono estratosférico.

1.1La Atmósfera Terrestre

La atmósfera terrestre es la parte gaseosa que rodea el Planeta, siendo por esto la capa más externa y menos densa del planeta por su constitución química. Está constituida por varios gases que varían en cantidad, según la presión y la temperatura a diversas alturas. Esta mezcla de gases que forma la atmósfera recibe el nombre de aire. En sus orígenes, la composición de la atmósfera se limitaba principalmente a cuatro o cinco compuestos (vapor de agua, dióxido de carbono, dióxido de azufre y nitrógeno junto con otras pequeñas cantidades de hidrogeno molecular). A medida que la Tierra evolucionaba, los efectos de la presión de erupciones volcánicas fueron expulsando a la atmosfera los gases más ligeros, mientras los más pesados quedaban atrapados por el efecto de la gravedad (Lopez, 2006). El 95% de masa atmosférica se encuentra en los primeros 15 km de altura desde la superficie terrestre. Entre los principales elementos que la componen están

el oxígeno y el nitrógeno además de gases trazas como el argón. Se parte de que estos gases, si bien se pueden encontrar ionizados en algunos sectores de la atmósfera, en general toda se establece neutra, es decir, la cantidad de cargas positivas y negativas que conforman la atmósfera, es igual (Parra, 2014).

La composición de la atmósfera varía según la altitud, ya que las distintas moléculas serán más o menos atraídas por la Tierra dependiendo de su peso molecular (Rodríguez, 2012). Las capas atmosféricas toman los diferentes criterios de clasificación, según la composición o la temperatura.

La troposfera que es la capa más próxima al suelo, tiene un espesor de unos 11 km, y en ella es donde se desarrolla la vida. Le sigue la tropopausa que es una línea de inversión de las temperaturas. Hasta llegar a ella, la temperatura decrece de 290 a 220 K (Rodríguez, 2012). Luego se encuentra la estratosfera situada entre los 11 y 45 km de altitud aproximadamente. En la estratosfera, las corrientes son horizontales, y se disponen en estratos. En la parte más baja la temperatura se mantiene constante según ascendemos. Sin embargo, este comportamiento cambia paulatinamente, debido a la ocurrencia de varias reacciones fotoquímicas, transformándose la energía electromagnética en energía térmica, incrementándose consecuentemente la temperatura. Así, a unos 45 km de altitud, la temperatura vuelve a tener valores máximos (Sánchez and Quintana, 2012). El ciclo del ozono, o sea la síntesis y destrucción, ocurre fundamentalmente en esta capa.

En el límite entre esta capa y la que le precede: la mesosfera hay una capa intermedia denominada estratopausa donde el gradiente de temperatura respecto a la altura nuevamente se invierte.

La mesosfera se encuentra entre los 45 y 90 km de altitud, contiene sólo cerca del 0,1% de la masa total del aire, la misma sobre importancia por la ionización y las reacciones químicas que ocurren en ella (Sánchez and Quintana, 2012). A medida que ascendemos, el ozono y la temperatura disminuyen hasta llegar a la mesopausa que es la capa límite. Por último, tenemos la región llamada termosfera, que es la capa más alejada del suelo, también se le denomina ionosfera. En esta capa, la temperatura vuelve a crecer con la altitud para llegar a unos 500 km, hasta temperaturas de 1.500 °C. En esta zona apenas hay masa. En ella tienen lugar las reacciones de disociación de las moléculas de oxígeno y nitrógeno.

La atmósfera protege la vida sobre la Tierra, absorbiendo gran parte de la radiación solar ultravioleta proveniente del Sol, a través con la capa de ozono. Además, actúa como escudo protector contra los meteoritos que se dirigen desde el espacio a nuestra superficie, los cuales se trituran en polvo a causa de la fricción que sufren al hacer contacto con el aire. En esta capa es común encontrar gran variedad de fenómenos eléctricos que surgen, se desarrollan o simplemente se trasladan de forma horizontal alcanzando alturas tales como estas.

A partir de las características mencionadas, y debido a la influencia de la gravedad, tanto la atmósfera como la ionósfera son, en primera aproximación, estratificadas. La estructura atmosférica puede ser netamente organizada por un perfil de temperaturas representativo, mientras que la ionósfera es más sensiblemente organizada por el número de densidad del plasma (Parra, 2014).

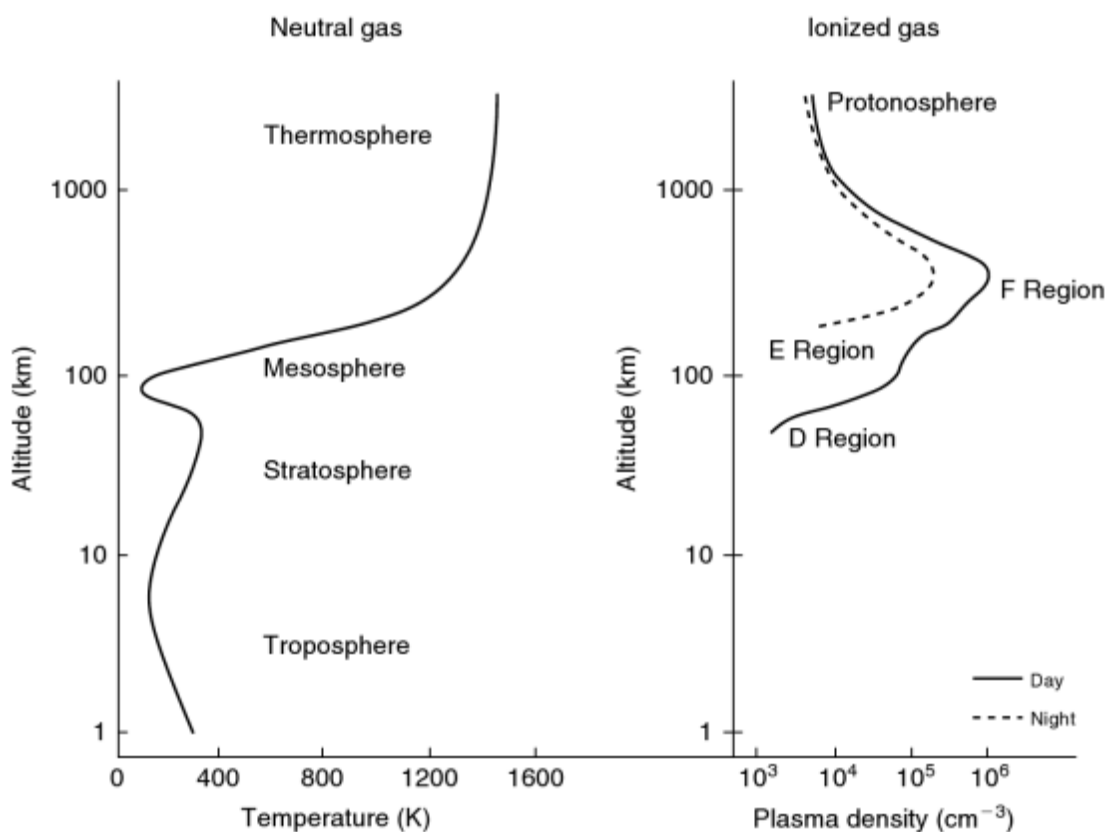


Figura 1. Perfil de temperatura del plasma ionosféricos y densidad del plasma en función de la altitud. (Sánchez and Quintana, 2012).

La temperatura atmosférica inicial decrece con la altitud desde la superficie terrestre, con una razón de alrededor de 7K/km en la tropósfera. Cerca de los 10

km de altitud, esta temperatura tiende a revertirse (en la tropopausa) y a partir de allí se encuentra la estratósfera. Este incremento es debido inicialmente a la absorción, por parte del ozono, de parte de la radiación solar ultravioleta (Parra, 2014).

1.2 Plasmas en la Atmósfera Terrestre

El objeto de estudio de esta investigación son los eventos luminosos transitorios, los cuales tienen en común el plasmático en su estado de agregación.

El plasma físico es el cuarto estado de agregación de la materia, un estado fluido similar al estado gaseoso, pero en el que determinada proporción de sus partículas están ionizadas y no poseen equilibrio electromagnético, por lo que es un buen conductor eléctrico. En consecuencia, los plasmas están formados por una mezcla de partículas neutras, iones y electrones (Milántiev and Temko, 1987).

El plasma presenta características propias, que no se dan en los estados de agregación sólidos, líquidos o gases, por lo que es considerado otro estado de agregación de la materia. Se puede decir que el plasma es un gas, al cual se le ha suministrado energía ya sea eléctrica, térmica, química, luminosa, nuclear hasta que este gas posea igual número de cargas libres positivas y negativas (Giner, 2013).

El plasma no tiene una forma o un volumen definido; pero a diferencia del gas en el que no existen efectos colectivos importantes como colisiones, el plasma bajo la influencia de un campo magnético puede formar estructuras como filamentos, rayos y capas dobles (Serway and Faughn, 2011). Este estado de la materia fue denominado plasma por primera vez en 1920 por Irving Langmuir Premio Nobel de Química. Los átomos de este estado se mueven libremente; aumentando su velocidad con la temperatura y en el momento de colisionar la velocidad es tan alta que se produce un desprendimiento de electrones, captura disociativa de estos o ionización por impacto electrónico (González-Elipe et al., 2013).

La acción de calentar un gas puede ionizar sus moléculas o átomos (reduciendo o aumentando su número de electrones para formación de iones), convirtiéndolo en un estado de plasma. El plasma es el estado de agregación de la sustancias más abundante de la naturaleza, y la mayor parte de la materia en el Universo visible se

encuentra en estado de plasma. Como lo son las estrellas que están a temperaturas de miles de grados, como lo es el Sol (Milántiev and Temko, 1987).

Estos gases altamente ionizados son excelentes conductores de la electricidad. Las partículas cargadas del plasma interactúan con el campo electromagnético local. Por lo que el movimiento organizado de esas partículas con carga puede originar campos eléctricos y magnéticos (González-Elipe et al., 2013) .

En el caso de los rayos comunes, se trata de un campo electrostático (asociado a una diferencia de potencial entre nube y nube, o entre una nube y la tierra). Un gas ionizado actúa como cualquier otro conductor, formando un canal de ionización, este es el caso de los rayos de tormentas o descarga súper-atmosférica, términos a veces usados por investigadores, para referirse a una familia de súbitos fenómenos eléctricos, que ocurren bastante frecuencia por encima de las altitudes de los destellos normales, como son los eventos transitorios luminosos TLEs. Los portadores de carga se distribuyen rápidamente en este medio, y de esta forma, la mayor parte del gas es apantallado a partir del campo, como es posible en otros conductores.

Los plasmas atmosféricos, habitualmente se generan mediante energía eléctrica. El campo eléctrico transmite energía a la nube electrónica, creándose un mayor movimiento de las especies cargadas. Esta energía electrónica se transmite a otras especies neutras debido a las colisiones producidas. Estas colisiones siguen una ley de probabilidad y pueden dividirse en colisiones elásticas e inelásticas (Giner, 2013)

Igualmente se puede plantear que un plasma es un gas ionizado que tiene un gran número de partículas suficientes cargadas, apantalladas entre sí (electrostáticamente), en una distancia pequeña comparada con otras longitudes de interés físico, y de otras ramas de las ciencias en general, por su cercanía a la vida del hombre en el planeta Tierra y la gran abundancia de fenómenos en este estado de la materia, que encontramos en el Universo con formas diversas explicadas a la humanidad, a través de los conocimientos científicos con los que contamos y la apreciación de sus propiedades (McCarthy et al., 2013) .

La física de plasmas puede encontrar aplicación en diversas áreas, como son: las descargas de gas (electrónica gaseosa), la fusión termonuclear controlada, la física

del espacio o la astrofísica moderna, la conversión de energía de MHD (magneto hidrodinámica) y propulsión iónica.

Los plasmas constituyen la mayor parte de la materia conocida del universo (>99%), con formas interesantes. Con el actual desarrollo científico y tecnológico, los plasmas representan cada vez más, un papel más importante en nuestras vidas, no sólo está presente en las estrellas, sino que también aparece en fenómenos naturales en la Tierra. Su importancia para la sociedad crece continuamente y los plasmas forman una parte esencial de la infraestructura tecnológica de los países desarrollados, por ejemplo para aplicaciones industriales. En paralelo, la utilización del plasma en el desarrollo de la fusión nuclear, que plantea una posible solución al problema de la energía ha alcanzado un alto grado de desarrollo y sofisticación. El desarrollo tecnológico requiere un esfuerzo continuado no sólo en el campo de la ciencia básica de plasmas, sino también en el de los diagnósticos, que son la clave para entenderlos y controlarlos. Asimismo, conocimientos procedentes de los estudios de plasmas astrofísicos y atmosféricos tienen una contribución importante en dicho desarrollo, además de ampliar nuestro entendimiento del universo y de la Tierra (Milántiev and Temko, 1987).

Este desarrollo constata una fuerte interrelación entre las técnicas y tecnologías empleadas en el diagnóstico de los distintos plasmas, siendo dicha constatación de esperar, dado que la mayor parte de la física y de los fenómenos conocidos es común a todos ellos, por ejemplo, la turbulencia, el transporte, o la interacción del plasma con la materia sólida o la radiación, siendo muy llamativo que los diagnósticos cubran casi todo el espectro electromagnético, desde los rayos-X hasta las microondas, e involucren un gran número de fenómenos de la física. Los mismos se pueden encontrar de forma natural en la atmosfera, dado la tendencia a formar estructuras como filamentos, rayos. Como tantos fenómenos atmosféricos se encuentran en nuestro planeta y a algunos aún no somos capaces de encontrarles aplicaciones.

Aunque los plasmas involucran distintos intereses científicos dada su gran variedad, todos se pueden agrupar en varias categorías fácilmente identificables: plasmas con aplicaciones industriales para la síntesis o análisis de materiales; plasmas destinados a estudios de física básica y a estudios dentro de la astrofísica y la

atmósfera; plasmas con aplicaciones tecnológicas, y plasmas relacionados con la fusión nuclear. Al realizar dicha agrupación es llamativo ver el gran rango de densidades (o presiones), temperaturas y dimensiones, el amplio número de métodos de calentamiento, y la enorme variedad de especies presentes.

El estudio de los plasmas deberá escoger el modelo más apropiado para el fenómeno que le ocupe. Las diferencias entre los modelos residen en el detalle con que se describe un sistema, de modo que se puede establecer jerarquía en la que descripciones de nivel superior se deducen de las inferiores, tras asumir que algunas de las variables se comportan de forma prescrita. Estas asunciones o aproximaciones razonables no son estrictamente ciertas, pero permiten entender fenómenos que serían difíciles de tratar en modelos más detallados. Los modelos fundamentales más usados en la física del plasma, listados en orden decreciente de detalle, es decir de microscópicos a macroscópicos son los modelos discretos, los modelos cinéticos continuos y los modelos de fluidos o hidrodinámicos (Serway and Faughn, 2011).

La física del plasma es el estudio del comportamiento de sustancias (en general gases) altamente ionizadas, que constituyen un estado de la materia denominado plasma. La importancia que ha adquirido esta rama de la física se debe sobre todo, a que la mayor parte del Universo está formado por materia en estado de plasma, además de la gran cercanía que tiene con nuestro entorno de vida, y la posibilidad de realizar reacciones de fusión nuclear controlada a partir del plasma (McCarthy et al., 2013). En la Tierra nos encontramos con el plasma en los canales de los rayos, en diferentes descargas eléctricas, entre otras tantas expresiones naturales en las que podemos encontrar fenómenos en este estado de agregación.

1.3 Eventos Luminosos Transitorios en la Atmósfera Terrestre.

En la década de los 20, del siglo XX, el físico escocés C. T. R. Wilson predijo que súbitos fenómenos eléctricos debían ocurrir en la atmósfera muy por encima de las tormentas. Pero no fue hasta mucho tiempo después, cuando un grupo de investigadores de la Universidad de Minnesota, dirigidos por John R. Winckler, en Julio de 1989 probaba una cámara que iba a ser instalada en un cohete para investigar la atmósfera (Luque et al., 2010). Por azar apuntaron la cámara hacia un

punto del cielo sin dar importancia a que bajo él, en el horizonte, se vislumbraban las nubes de una tormenta cientos de kilómetros al norte, fotogramas de su grabación iniciaron una línea de investigación que ha cambiado radicalmente nuestra visión de la mesosfera, la capa de la atmósfera situada entre 50 y 100 kilómetros de altura. Antes tenida por una capa más bien inerte y carente de fenómenos físicos relevantes. Lo que ha contribuido al conocimiento de fenómenos a menores alturas, que tienen su origen en este tipo de eventos momentáneos(Francisco José Gordillo Vázquez et al., 2011).

Algunos años después Davis D. Sentman, de la Universidad de Alaska en Fairbanks, se inspiró en la obra de William Shakespeare "El sueño de una noche de verano" para bautizar estas emisiones con el nombre de sprites, que podríamos traducirlo como espectro o duende dada su naturaleza equivoca y misteriosa. La mesosfera la capa donde ocurren mayormente estos fenómenos, ha sido considerada el territorio donde habitan junto a los sprites y duendes una multitud de parientes de los rayos. Estas breves emisiones luminosas causadas por la actividad eléctrica de la atmosférica, se le denominan eventos luminosos transitorios (Francisco José Gordillo Vázquez et al., 2011).

Los TLE (Transient Luminous Events o TLE por sus siglas en inglés) descubiertos en 1989, son descargas eléctricas de origen diverso que dan lugar a diferentes tipos de plasmas débilmente ionizados entre las partes altas (10 km–15 km) de las nubes de tormenta y la baja y alta estratosfera. Comencemos por un tipo eventos de este tipo, los sprites o duendes de hecho, la especie más frecuente de TLE corresponden a filamentosas extremadamente luminosas que se extienden a alturas de entre 50 y 85 kilómetros mayoritariamente. Presentan un diámetro de algunas decenas de kilómetros y duran centésimas de segundos(Luque et al., 2010). Los sprites surgen siempre del campo eléctrico, producido por un rayo en la troposfera, la capa más baja de la atmósfera, que se extiende hasta los 15 kilómetros de altura. Pero no todos los rayos engendran sprites, esta especie de ELT suele producirse solo algunos milisegundos después del rayo, sin embargo en numerosas ocasiones se ha observado algunos que han sido iniciados cientos de milisegundos después, nos referimos a los sprites retardados(Williams, 2011). La diferencia entre sprites rápidos y retardados radica en la dinámica microscópica, puesto que la generación y pérdida de electrones libres en un plasma de aire está dominada por dos

fenómenos la ionización y la captura disociativa(Rojas, 2015). Si consideramos solo estos dos procesos, la ruptura se produce cuando se generan más electrones de los que se pierden (Parra-Rojas et al., 2015). A la altura de los sprites, ese tiempo es del orden de las decenas de milisegundos, precisamente lo que suele necesitar un sprites retardado para iniciarse. En su estructura espacial podemos encontrar la parte superior del sprites, a partir de unos ochenta o noventa kilómetros, la misma es una descarga difusa, pero su parte inferior presenta “tentáculos”: decenas de filamentos de plasma de entre diez y cien metros de grosor (Francisco José Gordillo Vázquez et al., 2011). El nombre técnico de estos tentáculos es streamers: delgados filamentos de gas ionizado que suelen preceder a las descargas eléctricas (Gordillo-Vazquez and Luque, ´2013). Un gas ionizado es un buen conductor de la electricidad y es sabido que un conductor acabado en punta, acrecienta el campo eléctrico en torno a esta. En la mesosfera se producen frecuentemente sprites cuyos filamentos de plasma bajan hasta los 40 kilómetros(Notholt and Winkler, 2014).

Los espectros o sprites son descargas eléctricas de gran escala, que ocurren muy arriba de las nubes de tormentas. Los sprites son vertidos luminosos transitorios en la mesosfera, que se producen por encima de tormentas eléctricas activas(Winkler and Notholt, 2014a), o cumulonimbos, dando lugar a un rango de figuras. Son producidas por las descargas de rayos positivos entre las nubes y la tierra. El fenómeno fue denominado a partir del malévolo duende Puck (duende de aire) en la comedia “Sueño de una noche de verano” de William Shakespeare. Normalmente tienen coloración rojiza naranja o azul verdosa, con 'tentáculos' colgantes, y ramas arqueadas arriba(Francisco José Gordillo Vázquez et al., 2011).

Otro Miembro de esta familia de fenómenos luminosos, corresponde a los Chorros Azules (Blue jets). Desde comienzo del siglo XX existen testimonios de la observación de alargadas columnas de intensos colores azules elevándose por encima de las nubes de tormentas(Rojas, 2015). Los chorros azules se diferencian de los espectros, en que se proyectan desde la cima de un cumulonimbo por encima de una tormenta, típicamente en un estrecho cono, hacia los niveles más bajos de la ionósfera, 40 a 50 km encima de la Tierra (Siingh et al., 2011). Además, mientras los espectros rojos tienden a ser asociados con significativos golpes de luz, los chorros azules no aparecen directamente arrancados por destellos (sin embargo, ellos aparecen relacionados con la fuerte actividad de la nieve en las tormentas). Son

además más brillantes que los espectros, como lo indica su nombre, son de color azul(Luque and Ebert, 2011). Se cree que el color se debe a un conjunto de líneas de emisiones azules y cercanas a los ultravioleta provenientes de moléculas de nitrógeno neutras e ionizadas. Fueron registradas por primera vez el 21 de octubre de 1989, en el video monocromático de una tormenta en el horizonte, tomada desde el Space Shuttle mientras pasaba sobre Australia. Estas descargas eléctricas ascendentes avanzan a unos 100 kilómetros por segundo y se caracterizan por unas emisiones de color azul o cian que duran unos 200 milisegundos. Pueden llegar hasta los 45 kilómetros de altitud y comienzan en la parte alta de nubes de tormenta, de las que surgen abundantes rayos(Rojas, 2015) donde se han detectado los llamados Blue Jets y Blue Starters o Iniciadores azules, respectivamente. En la estratosfera se han observado Jets Azules Gigantes (Giant Blue Jets) que llegan hasta los 80 km de altura (baja ionosfera) y transportan hasta allí cargas negativas de alturas inferiores.

También encontramos los Halos, en los que enormes destellos entre los 80 y 90 kilómetros de altura con diámetro de unos 100 kilómetros y forma de cuenco, los halos duran entre 1 y 2 milisegundos (Passas et al., 2014). Pueden aparecer solos o junto a un duende. Dado que es una descarga difusa no actúan los mecanismos de focalización de un campo eléctrico, los campos máximos alcanzados en un halo son muy inferiores a los de un duende y así como también son menores sus intensidades luminosas(Francisco José Gordillo Vázquez et al., 2011).

Los Elfos o Elves que aunque predichos en 1991 no fueron detectados y fotografiados hasta 1996 son otro tipo de TLE, con estructura en forma de donut de aspecto difuso, con anchuras comprendidas entre los cien y los trescientos kilómetros y que han sido observados a alturas de entre 80 y 100 kilómetros(Luque et al., 2010). Los elves se caracterizan por su expansión lateral y destacan por ser el tipo de TLE de más corta duración (entre uno y cinco milisegundos).

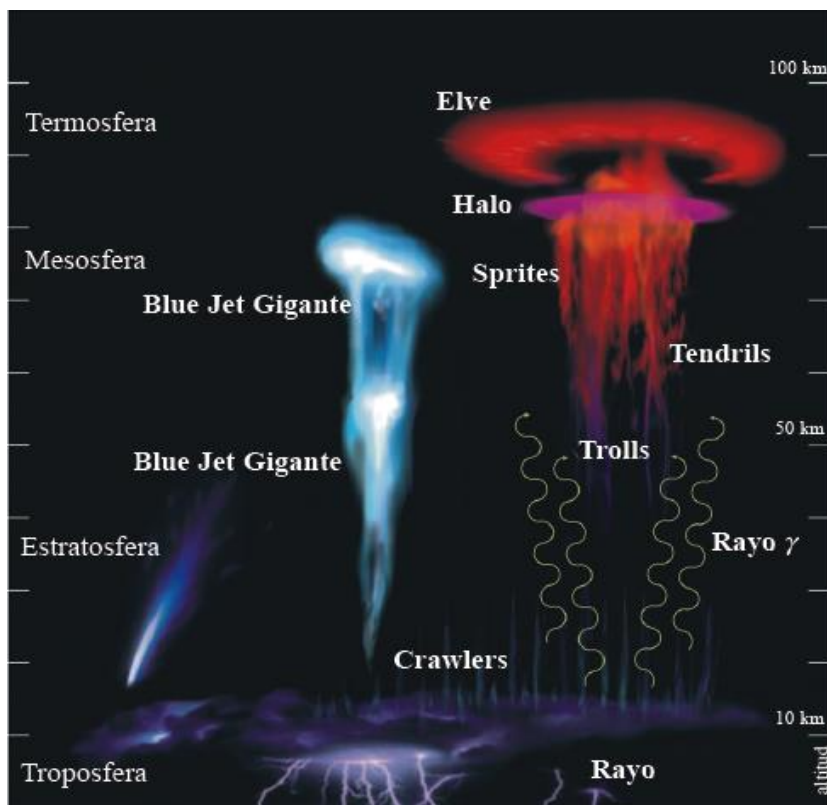


Figura.2. Esquema con los diferentes TLEs detectados en la atmósfera terrestre desde 1989 hasta la fecha (Francisco José Gordillo Vázquez et al., 2011).

Los TLEs son hermosos fenómenos naturales y se suele hablar de ellos como “fuegos artificiales”. Pero no es solo su valor estético lo que interesa a los investigadores de estos fenómenos. Lo primero que hace interesantes a los TLEs es el espacio en el que habitan, es decir la relativa cercanía a nuestro entorno terrestre. Los geofísicos prestaban poca atención a la mesosfera, que es la capa donde ocurren los eventos transitorios luminosos. Se torna difícil realizar investigaciones a alturas en el que la atmósfera es demasiado tenue para soportar un globo sonda y demasiado espesa para que pueda un satélite orbitar sin dificultad (Luque et al., 2010). No es hasta el descubrimiento de Winckler que se prestó más atención a esta capa de la atmósfera antes llamada por algunos “ignorosfera”. Cada vez que ocurre un evento luminoso transitorio, este les revela a los investigadores conocimiento sobre la mesosfera, mediante las emisiones que pueden ser observadas desde la Tierra o desde los satélites a gran altura. Algunas investigaciones han arrojado que en los eventos transitorio luminosos TLEs también están presentes en otras partes del Sistema Solar como Júpiter, Saturno, Venus y Titán, en los que ocurren también tormentas eléctricas, en este caso los TLEs

también serían una importante herramienta para el estudio de atmósferas extraterrestres (Yair, 2012) .

De la misma manera es de interés científico el papel que juegan los TLEs en el llamado circuito eléctrico global, esto es puesto que los rayos con carga polar negativas son más frecuentes entre otras cosas, porque las gotas de lluvia arrastran una ligera carga negativa hacia el suelo y el equilibrio electrónico se mantiene porque el planeta en las áreas más despejadas se descarga gracias al pequeño campo eléctrico, existente entre la ionosfera y el suelo terrestre, siendo la distancia entre las nubes de tormenta y la ionosfera el tramo que falta para que este circuito quede cerrado, estas dos partes del circuito están separadas por unos 10km aproximadamente y es en estas áreas donde habitan los TLEs (Rojas, 2015). Por otra parte es también de interés conocer de cerca de la influencia de los TLEs sobre la composición química de la alta atmósfera, además investigar cómo afectan los eventos transitorios luminosos las concentraciones de óxidos de nitrógeno (NO_x) (Markosyana et al., 2014) en moléculas del tipo OH e iones con carga negativos, (O_2^- , O_3^- , NO_2^-) donde todos un papel importante en los ciclos catalíticos que afectan a la concentración de ozono, (O_3) en la estratosfera, (Luque et al., 2010) sustancia gaseosa de vital importancia para la vida en la tierra

1.4 La electricidad en la Atmósfera: Los rayos

Desde los primeros tiempos de la humanidad los rayos han sido temidos, venerados y atribuidos a diferentes deidades como Zeus por los griegos, Thor por los vikingos y hasta en la Biblia son mencionados y considerados hechos divinos, pero también sido objeto de admiración por sus hermosas e interesantes formas, que los llevaron a quedar inmortalizados por las distintas concesiones de las artes desde aquellos tiempos.

No fue hasta mediados del siglo XVIII, cuando Benjamín Franklin realizó los primeros experimentos que arrojaron similitudes entre los rayos y la chispa eléctrica, siendo capaz de aprovechar el poder de puntas para construir el primer pararrayos

Los rayos son potentísimas descargas eléctricas entre nubes, dentro de nubes y entre las nubes y el suelo. Es el rayo la unión violenta de las cargas positivas y negativas, constituyendo una descarga eléctrica a través de gases de baja

conductividad a través de un canal de ionización (Francisco José Gordillo Vázquez et al., 2011).

El rayo es uno de los elementos del circuito eléctrico global de nuestro planeta, permite el intercambio de carga eléctrica entre las nubes y el suelo. Para que se realice una tormenta y se pueda producir un rayo, requiere que haya nubes de tipo cumulonimbos, una nube densa y potente, de dimensión vertical considerable en forma de montaña o de enormes torres. Cuando esa nube toma forma de yunque, entonces se puede clasificar como tormenta, se crea una gran diferencia de potencial que produce campos eléctricos, que son superiores al de ruptura dieléctrica del aire, dando lugar a la ionización del aire a altísimas temperaturas y a la formación de columnas de plasma que llamamos rayos (Luque and Ebert, 2011) . Al aumentar la carga se forman potenciales de hasta 300 MV entre nubes y tierra. El aumento de temperatura en los puntos por donde pasa la descarga (hasta un valor cercano a 30.000°C) y el brusco aumento de presión debido al calentamiento asociado generan una gran luminosidad (relámpago) y ondas de sonido que constituyen el trueno (Pereyra, 2009). La velocidad de propagación del sonido en el aire es del orden de 1200 km/h, de modo que el tiempo transcurrido entre el avistamiento del relámpago y el trueno permite estimar la distancia del observador al punto de ocurrencia del rayo.

En nuestro planeta existe un campo eléctrico vertical de 100 volt/metro en la atmosfera durante un día normal (la superficie terrestre se considera cargada negativamente). Pero a medida que la altitud es mayor, el campo es más débil. La diferencia total de potencial existente desde el nivel del mar hasta la parte superior de la atmósfera es alrededor de 400.000 volts. Se podría decir que la tierra actúa como un capacitor esférico con carga neta negativa y con una carga positiva igual en la atmósfera.

Según algunas investigaciones, los rayos pueden ser también los responsables de la emisión de rayos gamma terrestres (TGF) y positrones al espacio exterior. Entre los efectos que pueden causar están:

- Mecánicos: Destruyen edificios y objetos malos conductores de electricidad, y otros que también puede lanzar a distancia.

- Físicos: Imantan los objetos metálicos. La intensidad de las descargas pueden alcanzar 20 000 amperios.
- Químicos: Transforman el oxígeno en ozono, con un clásico olor fuerte, supuestamente a azufre. Causan la combinación parcial del nitrógeno del aire con oxígeno, formando compuestos nitrogenados.
- Fisiológicos: Son los más perjudiciales por causar muerte y daños permanentes. Algunas víctimas no presentan huellas del impacto, pero la autopsia revela hemorragias internas y congestión cerebral.

La explicación física de la conductividad de la atmósfera se debe a que existen iones que se desplazan en el campo produciendo la corriente. Esta ionización, que aumenta por unidad de volumen con la altitud, Es producida fundamentalmente por rayos cósmicos. También existen, por ejemplo, partículas de polvo llamadas demonios de polvo (dustdevils en inglés) que flotan en el aire y se cargan, y cristales de NaCl, producidos por el choque de olas marinas. Y en la tierra en forma de tornados mediante procesos de ionización, que en número suficiente acaban generando una avalancha electrónica capaz de sostener un plasma colisional en el interior del demonio de polvo, acompañado de emisiones ópticas visibles en forma de rayos (Francisco José Gordillo Vázquez et al., 2011). Estudios anteriores han dado a conocer que el relámpago puede producir óxidos de nitrógeno, y estos óxidos pueden reaccionar con otros gases en presencia de luz solar, para producir ozono en la troposfera y la estratosfera terrestre (Torres, 2000).

1.5 La Ionósfera

La ionosfera, es la capa de la atmosfera terrestre que se encuentra ionizada de forma permanente debido a la fotoionización, producto de la radiación solar incidente, se localiza entre 80 km y los 500 km sobre el nivel del mar.

La temperatura en esta capa puede llegar hasta los 1.500 °C, debido a que los gases en esta región se encuentran generalmente ionizados. Por lo que también se le conoce a esta capa como termosfera, lo que las densidades de los gases de la ionosfera son mucho más baja que en otras capas (Sánchez and Quintana, 2012),

Esta capa juega un papel importante, porque contribuye a la reflexión de ondas de radio emitidas desde la atmósfera terrestre, que pueden viajar grandes distancias, gracias a las partículas cargadas existentes en esta capa. Propiciando la comunicación terrestre de gran importancia para la vida, además debido al rozamiento con el aire ionizado se desintegran gran cantidad de los meteoroides que se acercan a la superficie. En las regiones polares del planeta, las partículas cargadas traídas por el viento solar, son atrapadas por los campos magnéticos terrestres, incidiendo sobre las zonas superiores de esta capa. Lo que da lugar un fenómeno en forma de brillo o luminiscencia, que aparece en el cielo nocturno llamado auroras, que pueden ser boreales y australes (Pasko, 2010) . Al ser la ionosfera terrestre un medio dispersivo por naturaleza, las señales electromagnéticas generadas por los satélites pertenecientes al sistema GPS (Sistema de Posicionamiento Global) sufren retrasos y alteraciones.

Además de los rayos, las auroras y los eventos transitorios luminosos, se puede considerar la existencia de un tipo de plasma permanente en las capa más externas de nuestro planeta y de otros del sistema solar: la ionosfera. A esta se le asocia la propiedad eléctrica, como parte de Circuito Electrónico global, de engendrar gran cantidad de eventos de este tipo, por la diferencia de potencial existente entre esta capa es decir la ionosfera y las nubes de tormentas. Considerando esto no se puede dejar de resaltar su vital importancia, partiendo de su propiedad de comunicación por radio, y además contribuye a las estrategias de investigaciones modernas (Sánchez and Quintana, 2012).

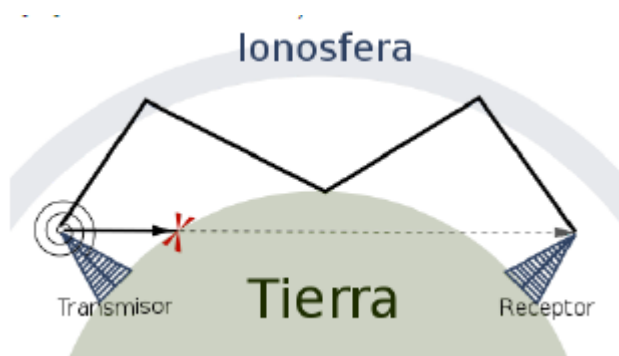


Figura.3. Comunicación terrestre a través de la Ionósfera (Pasko, 2010).

La ionosfera puede dividirse en varias regiones o subcapas: D (por debajo de 100 km), E (100-150 km), F (F1 (150-200 km) y F2 (por encima de 200 km)).

- Región F: caracterizada por iones atómicos O^+ y N^+ (toda la región), He^+ y H^+ (mayor altura).
- Región E: iones NO^+ y O_2^+
- Región D: iones positivos moleculares más complejos.

1.6 Ozono

1.6.1 Historia y Ozono en Estado Natural

En 1785, el químico holandés Martin van Marum, sometió algunos gases a descargas eléctricas que eran generadas con la máquina electrostática. Entre estos gases experimentó con oxígeno en estado puro, cuyo volumen se redujo gradualmente con el paso del tiempo de exposición a las descargas (Saborit, 2005). Como el volumen de los gases siempre tendía a disminuir, dedujo que durante las descargas eléctricas tenían lugar reacciones químicas en los gases. Tras los experimentos percibió un olor característico, único y punzante e irritante; y que tenía la propiedad de empañar al mercurio, van Marum se refirió al mismo como «el olor de la materia eléctrica». Este olor era producto de la formación de ozono, dado la compresión que se producía en el oxígeno, puro producto con la acción de las descargas, siendo este el primer hallazgo experimental del descubrimiento científico del ozono (Lopez, 2006).

No fue hasta 1840, que el químico germano-Suizo Christian Friedrich Schönbein, identificó al ozono, por su fuerte olor, que según él, obedecía a la formación de una sustancia derivada del oxígeno. Incluso se pensaba que este gas podía pertenecer al grupo de los cloruros o bromuros. No fue hasta 1865 que Jacques-Louis Soret determinó la fórmula del ozono (O_3) o trioxígeno y aclaró su composición química y en el año 1867, fue confirmado por Schönbein (Saborit, 2005).

Charles Fabry y Henri Buisson determinaron en el 1920, la medida "in situ" de su concentración en la atmósfera y para ello usaron las medidas de la radiación ultravioleta cerca del suelo. De esta manera se logró estimar un espesor de la capa de ozono de 3mm. Paralelamente, en esa época Gordon Miller Bourne Dobson, físico y meteorólogo británico, fue capaz de medir por vez primera la columna de ozono en atmósfera, de forma precisa. Lo que trajo consigo el establecimiento de las variaciones latitudinales y anuales del mismo. Ya por el 1929, un matemático y

geofísico angloamericano llamado Sydney Chapman, sugería que la formación del ozono es dada por la acción de la fotodisociación que sufre el oxígeno molecular bajo la acción, en longitudes de onda mayores que 200 nm proveniente del Sol. Creando además lo que hoy se conoce como Ciclo de Chapman, el cual se explica mediante un conjunto de reacciones químicas la formación y destrucción de ozono (Saborit, 2005).

El ozono, (del griego ὄζειν, tener olor) es una variedad alotrópica del oxígeno, su molécula triatómica se genera por la activación de la molécula diatómica del oxígeno. Esta forma alotrópica del oxígeno, constituida por moléculas triatómicas del elemento del mismo nombre tiene nomenclatura (O_3). El ozono gaseoso es incoloro, con un tono ligeramente azulado y tiene un característico olor acre que puede resultar irritante. Si se le enfría a $-112\text{ }^{\circ}\text{C}$ se convierte en un líquido azulado, capaz de solidificar a $-193\text{ }^{\circ}\text{C}$ en una sustancia de color azul-violáceo oscuro, casi negro. Definiéndose como una sustancia cuya molécula está compuesta por tres átomos de oxígeno, formada al disociarse los 2 átomos que componen el gas de oxígeno (Lopez, 2006). Cada átomo de oxígeno liberado pasa a unirse a otra molécula de oxígeno (O_2), formando moléculas de ozono (O_3).

La capa de ozono la podemos encontrar en la atmosfera, como un delgado escudo de gas que rodea a la Tierra, protegiéndola de los peligros de los rayos del Sol. La misma se encuentra situada entre los 10 y los 40 kilómetros por sobre la superficie terrestre, en la estratosfera. El ozono se produce mediante el efecto de la luz solar sobre el oxígeno, siendo la única sustancia en la atmósfera que puede absorber la dañina radiación ultravioleta, proveniente del Sol.

El ozono se encuentra mayoritariamente entre los 15 y los 35 Km de altura sobre el nivel del mar, donde podemos encontrar sus máximos de concentración. Su concentración en la atmósfera generalmente se mide en Unidades Dobson (UD), que no es más que un espesor de 0.01 mm de ozono puro a la densidad, que tendría si se encontrase a la presión de 1 atm y 0°C . Si 100 DU de ozono fueran traídas a las condiciones de presión y temperatura de la superficie de la Tierra formarían una capa de 1 mm de espesor (Lopez, 2006). En las zonas de los trópicos, los niveles de ozono típicos se mantienen entre 250 y 300 DU a lo largo del año, pero en las regiones templadas se suelen dar grandes variaciones de nivel en

las distintas estaciones, con oscilaciones que van desde niveles de 475 DU a menos de 300 DU. En la zona de la Antártida, durante la formación del "agujero" de ozono, en la primavera, se han llegado a medir valores tan bajos como de poco más de 100 DU. La cantidad media de ozono en la atmósfera es de 350 UD, correspondiente a un espesor de tan solo 3.5 mm en condiciones normales. Dada la baja concentración de ozono en la atmósfera terrestre, incluso en la zona de mayor concentración es decir los trópicos, lo adecuado sería hablar de pantalla de ozono en lugar de capa de ozono (Saborit, 2005).

1.6.2 Propiedades fisicoquímicas del Ozono e Importancia

El ozono se forma a partir de oxígeno molecular en una reacción fuertemente endotérmica. Se utiliza la energía eléctrica tanto en el laboratorio, como en la industria (descargas de 10000V) y la radiación solar en él para su obtención de forma natural. Para la separación de ozono del oxígeno molecular, se realiza por adsorción del mismo sobre gel de sílice a una temperatura de -78 °C (adsorbato azul oscuro), seguida de un calentamiento lento en una corriente de gas inerte(Solomon, 1999). La longitud de enlace de 127,8 pm entre dos átomos de oxígeno , confirma una participación considerable de doble enlace, equivalente a un orden de enlace de 1.3, con momento dipolar de 0,58 Debye(Saborit, 2005). El ozono, es un gas de color azul claro en sus condiciones normales. El olor único y punzante, se nota incluso en concentraciones por debajo de 2 ppm y puede llegar a ser tóxico en concentraciones elevadas (Lopez, 2006).

El ozono es poco soluble en agua (1g. l^{-1} ; 25 °C), algo más soluble en CCl_4 y muy soluble en hidrocarburos fluorados. En estado líquido (color azul) y sólido (negro-violeta), el ozono se descompone de forma explosiva, formando O_2 . El ozono es uno de los agentes oxidantes más fuertes, casi todos los metales (excluyendo el Au, Pt e Ir) son oxidados por el ozono, a los óxidos de más altos números de oxidación. Los halogenuros de hidrógeno y los iones halogenuro (excluyendo el HF y F^-), son oxidados fácilmente por el ozono (Solomon, 1999). En cambio los ozónidos de los metales, se obtienen en forma de sólidos de color rojo-naranja (poco estables y solubles en amoníaco líquido).

Entre sus propiedades físicas, esta que es una molécula angular, con ángulo de 116° , con una estructura en resonancia con las dos configuraciones eléctricas disponibles. Su estado físico es un gas reactivo y oxidante de color azul claro, que resulta picante e irritante con olor característico. Las temperaturas a las que se condensa y se solidifica son a -112°C y -251°C , respectivamente. Su calor de formación es de -34.41Kcal/mol y su densidad a los 0°C es de 2.144g/l , con índice de refracción de 1.2226 (liquido), esta variedad alotrópica del oxígeno en la conversión a O_2 libera energía y en el paso de O_2 a O_3 requiere energía (Saborit, 2005).

Con temperaturas normales el ozono se encuentra en estado gaseoso, en disolución inestable en el aire o en el oxígeno, descomponiéndose relativamente deprisa y convirtiéndose nuevamente en oxígeno (O_2).

Existen otros gases como el Óxido nitroso (N_2O), el gas más abundante, que contiene nitrógeno después del nitrógeno molecular y es alrededor de 300 veces más efectivo como gas de efecto invernadero, que el dióxido de carbono. La troposfera y la estratosfera están actualmente involucradas en la destrucción de la capa de ozono, contribuyendo indirectamente al incremento de la radiación UV (Fleming et al., 2008).

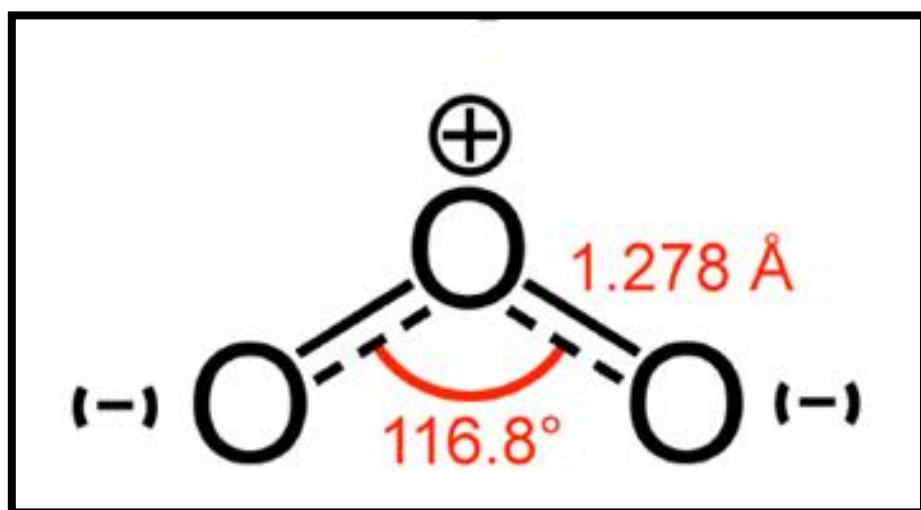


Figura.4. Molécula de ozono (Hoffman, 2005).

Ahora bien, al ser el ozono una molécula que se encuentra de forma natural en la Atmósfera Terrestre, rodeándola por una capa fina o pantalla de gas. De esta manera protege a la Tierra de los rayos ultravioletas del Sol. Lo que trae consigo que sin su protección, la humanidad esté expuesta a diversas enfermedades, como son el cáncer de piel y las quemaduras graves. Por lo que se puede plantear que el agotamiento de la capa de ozono llevará a la reducción de su capacidad protectora y, en consecuencia, a una mayor exposición a la dañina radiación, lo que haría imposible la habitabilidad planetaria.(Saborit, 2005).

En la actualidad, la situación de la capa de ozono es grave, pues cada primavera austral se abre un "agujero" en la capa de ozono sobre la Antártida, tan extenso como los Estados Unidos y tan profundo como el Monte Everest. El agujero ha crecido casi todos los años, desde 1979. En los últimos años ha llegado alcanzar tamaños alarmantes(Lopez, 2006).

La troposfera, capa de la atmosfera más cercana a la tierra que la capa de ozono, se encuentra entre los 10 y 40 km sobre el nivel del mar, la misma no está expensa a tener una gran concentración de moléculas de oxígeno en su forma alotrópica o sea ozono. En la actualidad, el ozono es uno de los oxidantes fotoquímicos presentes en el aire, sin lugar a dudas el más importante y el más estudiado, pese a que este ozono presente de forma natural en la troposfera, es un gas de tipo traza. Lo que es de suma importancia, puesto que es el iniciador de las cadenas de oxidación en esta capa es capaz de formar OH y H_2O , que oxidan a la mayoría de los gases reducidos (Solomon, 1999). Por lo que se puede señalar que es el controlador de la capacidad oxidativa de la atmosfera, sin el ozono gases reducidos como los hidrocarburos, el monóxido de carbono y muchos compuestos de azufre y nitrógeno reactivos se acumularían en la atmosfera.

Este ozono troposférico también actúa como gas de efecto invernadero y la acción del hombre sobre el cloro liberado de las moléculas de ciertos compuestos estables, que es atacado por la intensa radiación ultravioleta, puede despojar a la molécula de ozono de un átomo, dando lugar al CLO (monóxido de cloro) y al oxígeno normal. Cada molécula de clorofluorocarbonos o CFC destruye miles y miles de **moléculas de ozono**, alterando fuertemente el equilibrio natural.

Además, está mundialmente reconocido que aplicaciones adecuadas de ozono, tienen una acción bactericida, germicida y fungicida, destruyendo con gran rapidez estreptococos, estafilococos, colibacilos, etc., así como las más enérgicas toxinas.

La molécula de ozono también se puede producir artificialmente, mediante un generador de ozono u otro método convencional, este ozono también se utiliza en la industria, como precursor de la síntesis de algunos compuestos orgánicos, o como depurador y purificador (Hoffman, 2005). Este O_3 produce la eliminación casi absoluta de olores, bacterias, virus, hongos, parásitos y otros microorganismos presentes en el aire. En oficinas y locales de trabajo, debido a que la permanencia de personas es prolongada, resulta conveniente ozonizar para lograr el bienestar y la mejora del rendimiento en el trabajo. Así mismo, el ozono es empleado para la purificación y desinfección del agua, eliminando tanto bacterias, como virus, algas, hongos y otros microorganismos causantes de enfermedades. Las heridas infectadas, aun cuando se encuentran vendadas, así como las manos y material con que son manipuladas, son también un importante foco infeccioso (Lopez, 2006). Por estos motivos, en los hospitales y clínicas es muy importante trabajar con la mayor asepsia posible, y muchos son los métodos empleados para evitar la propagación de gérmenes patógenos. De aquí, que resulte tan significativa la molécula de ozono en la vida diaria, ya sea ozono troposférico u ozono estratosférico, que es el que se encuentra de forma natural en la estratosfera, formando la denominada capa de ozono. Debido a esto cada 16 de setiembre, se celebra el día internacional de la protección de la capa de ozono y la protección de la radiación ultravioleta, para recordarnos que debemos ser consumidores más conscientes y cuidar nuestro medio ambiente.

1.7 Formación y descomposición del Ozono Estratosférico.

La estratosfera, es la capa de la atmósfera que se extiende entre los 11 y los 50 km y la tropopausa es la zona de transición entre la troposfera y la estratosfera. Es de un borde muy claro, pero no está exactamente a los 11 km, sino que oscila entre los 9 y los 18 km sobre el nivel del mar, dependiendo de la estación del año y de la latitud.

En esta zona la temperatura aumenta con la altitud, debido a la absorción de radiaciones UV por el oxígeno y el ozono. Esta distribución de temperaturas origina una "inversión térmica", que dificulta el movimiento vertical de los gases manteniéndolos perfectamente estratificados (estratosfera). Este perfil de temperaturas permite que la capa sea muy estable y evite turbulencias, algo que caracteriza a la estratosfera (Saborit, 2005).

El ozono en esta zona de la atmosfera a altitudes comprendidas entre 15 y 30 Km, puede llegar a concentraciones de hasta 10 ppm; concentraciones muy elevadas comparadas con las existentes en la superficie terrestre y tiene unos mecanismos de formación y de destrucción. Cuando la luz del sol incide sobre la estratosfera, las moléculas de oxígeno normal absorben la radiación ultravioleta de longitud de onda menor (UV-A), descomponiéndose en dos átomos de oxígeno. Estos átomos huérfanos se asocian a una molécula de oxígeno normal aprovechando la radiación UV-A absorbida. El resultado es una molécula de ozono, más la liberación de la radiación absorbida (Hoffman, 2005). El ozono también es un compuesto sensible a la radiación ultravioleta, pero prefiere la de longitud de onda mayor (UV-B). Cuando el ozono recibe la luz solar se descompone en una molécula de oxígeno, más un átomo huérfano y el ciclo vuelve a empezar, solo que la radiación UV-B no se devuelve. Esto ocurre mediante mecanismos de formación del ozono, que comprende dos etapas, la de descomposición de la molécula de oxígeno y reacción de los átomos de oxígeno con las moléculas de oxígeno. Seguido de la descomposición fotoquímica del ozono y por último la destrucción del ozono (Saborit, 2005). Este complejo y delicado ciclo, mantiene en equilibrio la cantidad de ozono en la estratosfera y además impide que la radiación ultravioleta UV-B, perjudicial para la vida terrestre, llegue a la superficie.

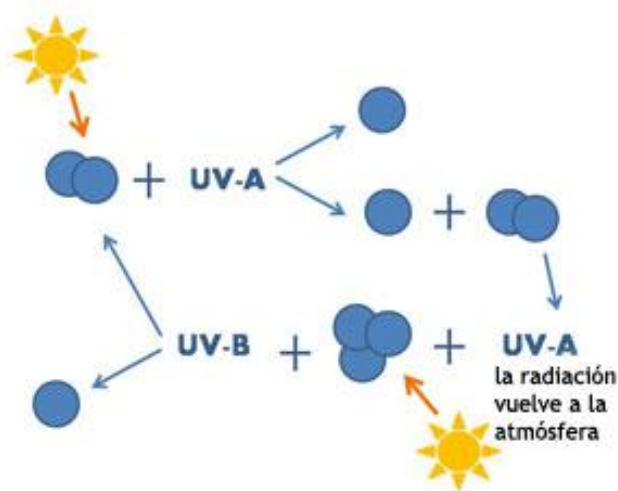
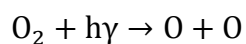


Figura.5. Ciclo de formación y destrucción del ozono (Hoffman, 2005).

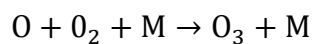
El mecanismo de formación del ozono en la estratosfera comprende dos etapas:

1. Descomposición de la molécula de oxígeno:



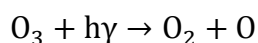
La ruptura de la molécula de oxígeno necesita de gran cantidad de energía solar. Produciéndose la absorción de radiaciones solares de alta energía ($\lambda < 242 \text{ nm}$) que no llegan a la superficie terrestre. En las capas altas de la atmósfera (por encima de los 80 km), los fotones de alta energía, disocian a las moléculas de dióxígeno (O_2), por lo que sólo es posible encontrar oxígeno monoatómico (O), como queda expresado en la reacción.

2. Reacción de los átomos de oxígeno con las moléculas de oxígeno:



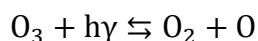
Este proceso se realiza con la presencia de otras moléculas M (generalmente nitrógeno u oxígeno), para disipar la energía producida en la reacción. La radiación solar es máxima en el Ecuador, por lo tanto es allí donde tiene lugar la mayor parte de la producción de ozono a unos 22 Km de altura, donde las condiciones son óptimas. Producido el ozono se desplaza horizontalmente hacia los polos y va disminuyendo en altitud. La mayor parte del ozono que se introduce en la troposfera se destruye parcialmente, dado su fuerte carácter oxidante (Hoffman, 2005).

La descomposición fotoquímica del ozono, junto al proceso de formación del ozono, tiene lugar también su proceso de descomposición fotoquímica. El ozono absorbe radiación ultravioleta ($240 < \lambda < 310 \text{ nm}$), descomponiéndose de forma inversa a como se formó:

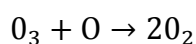


Este proceso de descomposición fotoquímica es el que le confiere a la capa de ozono, su papel importantísimo como escudo protector al absorber las radiaciones ultravioletas, protegiéndolo de llegar a la superficie terrestre causarían efectos perjudiciales. Según teorías actuales, el origen de la vida en nuestro planeta no hubiese podido tener lugar sin esta protección ultravioleta, sin esta capa de ozono (Saborit, 2005).

Podemos sintetizar diciendo, que se establece un equilibrio entre la formación y la destrucción del ozono que tiene como resultado la absorción de la radiación ultravioleta.



Por último, la destrucción del ozono. Existe otra reacción expuesta por Chapman en 1930 que supone una doble pérdida:



Por una parte, se pierde ozono y por otra oxígeno atómico, capaz de producirlo. La velocidad de dicha reacción, es relativamente lenta. Ahora bien, este proceso de destrucción es catalizado por determinadas especies químicas (Hoffman, 2005).

Nombre	Abreviación	Longitud de onda (nm)	Energía por fotón (eV)
Ultravioleta cercano	NUV	400 – 200	3,10 – 6,30
Onda larga	UVA	400 – 320	3,10 – 3,87
Onda media	UVB	320 – 280	3,87 – 4,43
Onda corta	UVC	283 - 200	4,43 – 6,20
Ultravioleta lejano	FUV, VUV	200 – 10	6,20 - 124
Ultravioleta extremo	EUV, XUV	91,2 – 1	13,6 – 1240

Tabla.1. Según su longitud de onda, se distinguen varios subtipos de rayos ultravioleta (Saborit, 2005).

El ozono estratosférico, es de importancia primordial en el balance ecológico del planeta Tierra. Porque a partir de sus procesos de formación y destrucción, actúa como pantalla, impidiendo la llegada de la radiación ultravioleta de corta longitud de onda, extremadamente destructora para los tejidos vivos. Se acostumbra a distinguir tres regiones en esta parte del espectro: la ultravioleta A (o UV-A) entre 320 y 400 nanómetros (nm, 10⁻⁹ metros o millonésimas de milímetro), que es la más próxima al visible; la UV-B, entre 280 y 320 nm y la UV-C, de longitud de onda inferior a 280 nm. De ellas, el ozono prácticamente no absorbe la UV-A, su formación y disociación absorben totalmente la UV-C, impidiéndole llegar a tierra; en cuanto a la absorción de UV-B, depende marcadamente de la concentración de O₃. Esta se puede medir desde tierra, gracias al espectrofotómetro G.M.B. Dobson, ideado y construido en 1924, por este ilustre científico para su doctorado. Los equipos actuales, básicamente análogos, pero aprovechando la electrónica y la

miniaturización, permiten incluso hacer observaciones de noche con luz de luna (Zanón, 1996)

1.8 Ciclo de Chapman del ozono.

En 1930, Sydney Chapman fue el primero en crear un modelo que intenta dar explicación del perfil de concentración de ozono en la atmósfera. Dando lugar al Ciclo de Chapman, de reacciones no catalíticas de destrucción y producción de ozono, que conocemos hoy en día, el esquema estático basado únicamente en especies oxigenadas.

Este modelo sencillo, pero realista del comportamiento del ozono estratosférico, se describe a partir del siguiente sistema de ecuaciones de las reacciones químicas de compuestos oxigenados, explicadas en el epígrafe anterior.

- 1) $O_2 + h\nu \rightarrow O + O$
- 2) $O + O_2 + M \rightarrow O_3 + M$
- 3) $O_3 + h\nu \rightarrow O_2 + O$
- 4) $O_3 + O \rightarrow 2O_2$
- 5) $O + O + M \rightarrow O_2 + M$

Los procesos anteriores son reacciones químicas, en las cuales M es cualquier elemento mayoritario en la atmósfera, que actúa como catalizador (N_2 y O_2 en este caso). La ecuación (5) es una reacción demasiado lenta para jugar un papel relevante en química estratosférica, por lo que en ocasiones no la encontramos formando parte del ciclo. Las reacciones (1) y (3) representan procesos fotoquímicos, necesitan energía en este caso del Sol para su ejecución. Para estas reacciones fotoquímicas h es la constante de Planck y γ la frecuencia incidente que es absorbida en la reacción fotoquímica. La reacción (1) es conocida como fotólisis del oxígeno. La reacción (2) es la de formación de ozono y en ella se libera mucho calor, dado que la temperatura en la estratosfera es mayor que la de las capas superiores e inferiores, y es tanto más lenta cuanto mayor sea la altitud en la estratosfera. En la reacción (3) ocurre la fotólisis del ozono, y por últimos (4) es la reacción de terminación (Hoffman, 2005).

Al caer el sol, la concentración de oxígeno cae muy rápidamente, ya que las reacciones sumidero (2) y (4) permanecen pero las reacciones fuente (1) y (3) se recortan. Con poca concentración de oxígeno, la reacción (4) tampoco tiene lugar. Las concentraciones de ozono varían a lo largo del día (Luque and Gordillo-Vázquez, 2012) . También varían con la estación del año, y con la altitud, a mayor altitud mayor concentración de oxígeno y menor concentración de ozono, que es dominante por debajo de 60 km sobre el nivel del mar(Lopez, 2006).

La acción sobre el ozono estratosférico de los TLEs es importante, ya que proporciona vías catalíticas para la destrucción y creación de la capa de ozono y participar en la oxidación de un número de especies químicas en la estratosfera. El total de perturbaciones de NO y O_3 registra concentraciones debido a un solo acontecimiento de un chorro Azul (un tipo de TLE), el que se ha modelado siguiendo un enfoque cinético que muestra una mejora de 10% y 0,5% en 30 kilómetros de altura (Gordillo-Vázquez, 2008).

CAPÍTULO 2. MATERIALES Y MÉTODOS.

En este trabajo se propone un modelo a partir de las ecuaciones cinéticas de la velocidad de las reacciones químicas del ciclo de Chapman para el ozono y el oxígeno y una ecuación de especies oxigenadas que ocurren en los Sprites y las reacciones de la ionización por impacto electrónico y la captura disociativa característica en los eventos luminosos transitorios, para lograr dinamizar y predecir a partir de esto, la influencia de estos fenómenos sobre el ozono. Las soluciones a las ecuaciones diferenciales de este modelo fueron procesadas numéricamente con el empleo del Software Wolfram Mathematica.

2.1 Química-física del Ozono.

Las propiedades química-físicas del ozono nos permiten declarar un ciclo fotoquímico que describe como se crea y se destruye, en forma de un ciclo catalítico en el que dada las propiedades de este elemento ocurre de forma natural en la estratosfera terrestre (Hoffman, 2005). En 1930 Sydney Chapman, propuso un mecanismo de formación en que el ozono se formaba por fotólisis del oxígeno, este ciclo es capaz de describir su destrucción y creación está dado por las reacciones:

- 1) $O_2 + h\nu \rightarrow O + O$
- 2) $O + O_2 + M \rightarrow O_3 + M$
- 3) $O_3 + h\nu \rightarrow O_2 + O$
- 4) $O_3 + O \rightarrow 2O_2$
- 5) $O + O + M \rightarrow O_2 + M$

Estos procesos son reacciones químicas, en las cuales M es cualquier elemento mayoritario en la atmosfera que actúa como catalizador (N_2 y O_2 en este caso). La reacción 5 es una reacción demasiado lenta para jugar un papel importante en la química estratosférica, por lo que solamente las primeras 4 reacciones son tenidas en cuenta representando dos etapas fotoquímicas (Lopez, 2006), así como descomposición de la molécula de oxígeno, reacción de los átomos de oxígeno con las moléculas de oxígeno, la descomposición fotoquímica del ozono y por último la destrucción del ozono.

Estas reacciones son descritas por ecuaciones diferenciales de velocidad de las reacciones químicas del ciclo de Chapman del ozono en este caso, para las concentraciones de oxígeno y ozono $[O]$, $[O_3]$ respectivamente

$$\frac{d[O]}{dt} = 2jO_2[O_2] - k_1[O][O_2][M] + jO_3[O_3] - k_2[O][O_3]$$

$$\frac{d[O_3]}{dt} = k_1[O][O_2][M] - jO_3[O_3] - k_2[O][O_3]$$

Donde en estas ecuaciones k_1 y k_2 son constantes cinéticas, que determinan las velocidades respectivas de las reacciones 2 y 4 (Rodríguez, 2012), reacciones lentas y determinantes de la concentración de oxígeno y ozono:

$$k_1 = 3.4 \times 10^{-13} \text{ cm}^{-6} \text{ s}^{-1}$$

$$k_2 = 3.26 \times 10^{-17} \text{ cm}^{-6} \text{ s}^{-1}$$

Y los parámetros j_1 (t) y j_2 (t) son los llamados coeficientes de primer orden de la tasa de fotólisis para el oxígeno y ozono respectivamente, el coeficiente de fotólisis depende de la probabilidad de que un fotón sea absorbido por una molécula determinada (etapa fotoquímica). En nuestro caso, las moléculas involucradas en esta etapa serían el O_2 y el O_3 respectivamente.

Esta probabilidad es diferente para cada una de estas moléculas, dependiendo directamente de la energía del enlace a disociar (Montecinos, 2005). La rapidez con que ocurre este proceso se estima directamente a partir del cálculo de los coeficientes de fotólisis respectivos según la siguiente expresión:

$$j_x = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \sigma_x(\lambda, T) \phi_x(\lambda, T) I(\lambda) d\lambda$$

Donde σ_x es el coeficiente de absorción en función de la longitud de onda y nos da una medida del número de fotones absorbidos por unidad de área. ϕ_x Es el denominado rendimiento cuántico que nos da una medida del por ciento de efectividad de los fotones absorbidos en la ruptura del enlace. Por último, $I(\lambda)$ es la

irradiación solar por nm que llega a la capa de la atmosfera bajo estudio y que varía en el transcurso del día.

En nuestro caso, para modelar la dependencia de los coeficientes de fotolisis con el tiempo emplearemos un modelo simplificado (Montecinos, 2005) que asume un comportamiento sinusoidal de la forma:

$$j(t) = \frac{j_{max}}{2} \left(1 - \cos\left(\frac{2\pi}{T}t\right) \right)$$

Aquí j_{max} es el máximo valor del coeficiente de fotolisis (Montesinos, 2005), que sería justo al mediodía, T es el valor del periodo de rotación (duración del día) que en nuestro caso será un parámetro variable. De su definición se deduce directamente que los valores instantáneos $j(t)$ se encuentran acotados en el intervalo $0 \leq j(t) \leq j_{max}$

A partir del teorema del valor medio y teniendo en cuenta la expresión anterior es muy simple obtener el valor del coeficiente de fotolisis medio como:

$$j_{med} = \frac{j_{max}}{2}$$

Vemos en este caso que los valores medios son sencillamente la mitad de los valores máximos obtenidos justo al mediodía. Según valores de las concentraciones del modelo ampliado (Montesinos, 2005).

$$j_1 = 9.02 \times 10^{-9} \text{ s}^{-1}$$

$$j_2 = 8.55 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$$

2.2 Modelos para especies plasmáticas en las que intervienen electrones.

La atmósfera terrestre es la parte del planeta conformada por gases que se encuentran desde su superficie hasta varios miles de kilómetros. Se parte de que estos gases, si bien se pueden encontrar ionizados en algunos sectores de la atmósfera, en general toda se establece neutra, es decir, la cantidad de cargas positivas y negativas que conforman la atmósfera, es igual. Este hecho no limita la existencia de electrones, reaccionando con los componentes químicos generalmente en estado gaseoso de la atmosfera.

Las grandes explosiones de supernovas son al menos, responsables de la aceleración inicial de gran parte de los rayos cósmicos, ya que los restos de dichas explosiones son potentes fuentes de radio, que implican la presencia de electrones de alta energía, entre otros tantos fenómenos de este tipo que ocurren y dan lugar electrones y otras partículas, como lo son la familia de eventos luminosos transitorios que ocurre desde las nubes de tormenta hasta la baja y alta estratosfera (Pasko1, 2010).

Las partículas cargadas representan una fracción muy pequeña de la masa total de la atmósfera terrestre, pero juegan un papel muy importante en fenómenos geofísicos como los relámpagos y las auroras polares, Así como otros procesos que dan lugar al llamado circuito eléctrico global (Luque and Vázquez, 2013).

Existen iones y electrones abundantes a partir de altitudes de 60 km. Esto es debido a que la mayor parte de la radiación EM ionizante es absorbida a estas altitudes por el ozono, como se ha explicado anteriormente, los iones y electrones son altamente reactivos. Pero, el tiempo libre medio aumenta al aumentar la altura y da como resultado tiempos de vida mayores. Pero estos sucesos no desestiman la existencia de electrones a menores alturas en la atmósfera (Gerken et al., 2000).

2.2.1 Reacciones de especies oxigenadas que ocurren en los sprites en la que intervienen electrones.

La ocurrencia de fenómenos ópticos transitorios en la atmósfera superior provocados por un rayo en tormentas eléctricas, sugiere que estos deberían ocurrir acompañados de perturbaciones químicas locales dentro de las regiones de emisión óptica. La cinética química detallada de la ruptura asociada con estos eventos y la química que caracteriza este tipo de reacciones, es específica para este tipo de fenómenos, el que tiene como característica el estado de agregación plasmático, en el que una región de gas de la atmosfera se ioniza parcialmente dando lugar a la formación de rayos en las tormentas eléctricas, producto de la diferencia de potencial existente entre las nubes de tormenta y la superficie terrestre, lo que provoca un escenario favorable para la aparición de estos fenómenos ópticos en la atmosfera superior (Kossyi et al., 1992) .

El término: eventos luminosos transitorios (TLE) es el nombre genérico adoptado por los investigadores para referirse a una colección diversa de tipos distintivos de corta duración (<1 segundo) de fenómenos ópticos tales como sprites rojos, chorros azules, elfos, halos de sprites y gigantescos chorros que se han encontrado para ser una ocurrencia común por encima de tormentas eléctricas (Green et al., 1996). La naturaleza de los efectos asociados con TLE se diferencia de otros procesos fotoquímicos, en la atmósfera superior en varios aspectos clave:

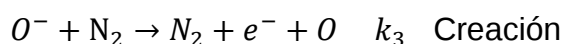
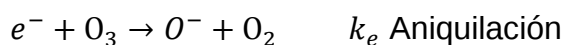
La primera diferencia es que los TLE son de tipo impulsivo. La escala de tiempo característico de avería eléctrica en la atmósfera superior, oscila entre milisegundos en el caso de los sprites y los elfos a unas pocas decenas a cientos de milisegundos para chorros azules y gigantescos chorros. Esto es mucho más corto que otros tipos de procesos de forzamiento externos que inducen variable en el tiempo, los efectos químicos en el sistema terrestre, tales como las variaciones de día y noche en fotoionización solar y llamaradas de rayos X, la precipitación de partículas, como por ejemplo en la aurora o en la precipitación de electrones relativista, o por acontecimientos de protones solares o asociadas con la modulación de flujo de rayos cósmicos por la actividad solar por ejemplo (Luque and Vázquez, 2013).

La segunda diferencia es que el sistema está en un estado de no equilibrio dada la ionización impulsiva, la disociación y la excitación, en los TLE crear mezclas de electrones, iones y especies químicamente activas en una característica química, en un principio, la configuración altamente inestable que está muy lejos del equilibrio químico (Gordillo-Vázquez, 2008). En consecuencia, una descripción dinámica de la química debe ser utilizada para seguir la evolución del sistema, que puede resolver las variaciones rápidas que se producen en escalas de tiempo de colisión.

La tercera diferencia es que los efectos están muy localizados espacialmente. Los efectos químicos inmediatos de avería en la atmósfera superior se limitan a un volumen relativamente pequeño de la atmósfera superior directamente encima de una tormenta eléctrica, en contraste con los grandes volúmenes afectados por la iluminación solar, la precipitación de partículas, o variaciones de los rayos cósmicos (Arnone et al., 2008).

De los diversos tipos de TLE, los sprites son la forma más comúnmente observados de la ruptura de la atmósfera superior, que ocurre generalmente en el rango de altitudes de la mesosfera entre 40-90 km, por encima de tormentas eléctricas. Imágenes telescópicas de sprites muestran la existencia de estructuras de plasma filamentosos estrechas en sprites, llamado serpentinas (Heavner, 2000) . El radio de serpentinas de sprites es decenas a cientos de metros a una altura de sprites. Los sprites parecen ser serpentinas eléctricas, iniciadas por la descomposición de gas de un fuerte impulso cuasi electrostático originario de un rayo subyacente, y pueden variar en complejidad desde serpentinas individuales hasta densas redes de serpentinas. Los filamentos o Serpentinillas están débilmente ionizados, los fenómenos de plasma frío, por lo general ocurre tan delgada, la propagación rápida de las estructuras de ionización no lineal. Las Serpentinillas de Sprites parecen ser encendidas principalmente en la altitud del rango de 70 a 80 km, y pueden abarcar distancias verticales de varias decenas de kilómetros (Luque and Vázquez, 2013).

Entre las reacciones de tipo plasmáticas que ocurren en la estratosfera nos resultan comunes fenómenos naturales como en los eventos luminosos transitorios en forma general, pero destacando en este caso los sprites cuyo filamento de plasma bajan hasta los 40km, dando lugar a diferentes tipos de plasmas débilmente ionizados entre las partes altas (10 km–15 km) de las nubes de tormenta y la baja y alta estratosfera representados por cientos de reacciones químicas que ocurren a estas alturas en la interacción de estos fenómenos con las mezclas gaseosas de estas capas de la atmosfera. De estas reacciones son relevantes para este trabajo reacciones de especies oxigenadas que ocurren en los sprites en la que intervienen electrones (Gordillo-Vázquez, 2008), como lo son por ejemplo:



En las cuales k_e y k_3 son las constantes cinéticas que determinan las velocidades respectivas de las reacciones anteriores.

Además del caso de los sprites hay otros fenómenos o características de estos eventos luminosos transitorios, en las cuales aparecen especies plasmáticas en las que intervienen electrones (Cheng et al., 2006).

2.2.2 Reacciones químicas de la ionización por impacto electrónico y la captura disociativa característica en los eventos luminosos transitorios.

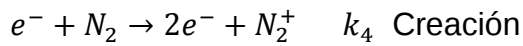
Para comprender los procesos físicos que subyacen a los TLE, debemos tener presentes las leyes que rigen las descargas eléctricas en gases. La más importante plantea que la energía de los electrones libres de la atmosfera, es proporcional al cociente entre el campo eléctrico (E) y la densidad de moléculas del aire (N). Este cociente, E/N , se denomina campo eléctrico reducido. Otro de los principios básicos, nos dice que los tiempos y las distancias características de las reacciones de esos electrones, como la ionización, son inversamente proporcionales a la densidad de moléculas (Luque and Vázquez, 2013).

Los distintos parámetros medidos se reportarían como función del valor del campo eléctrico, E , normalizado o al número de moléculas de la muestra gaseosa en estudio por centímetro cúbico, N . El parámetro normalizado o campo reducido como también se le conoce E/N , se emplea porque, además del efecto neto del campo, se debe de tener en cuenta el número de colisiones que estos sufren al atravesar un campo eléctrico que denominaremos en adelante "Brecha". Por ejemplo, las colisiones inelásticas restan energía a los electrones y el número de colisiones es proporcional a la densidad del gas, N , en la brecha. En este sentido, la energía promedio de los electrones depende del valor del campo y del número de moléculas por centímetro cúbico. En este trabajo, el parámetro normalizado E/N se medirá en la unidad llamada Townsend ($1Td = 10^{-17} \text{ Vcm}^2$) (Escamilla, 2007).

Lo más frecuente que le ocurre a los electrones libres en la atmosfera, es que choquen con una molécula y le arranquen un electrón o bien que sean atrapadas por una molécula o átomo. El primero de estos fenómenos (ionización por impacto electrónico) aumenta la densidad de electrones libres, el segundo (captura disociativa), la disminuye. Nuestra atmosfera está compuesta en su mayoría por nitrógeno y oxígeno molecular, por tanto las ionizaciones más frecuentes son la del oxígeno y la del nitrógeno. Por otra parte, en gases con una notable proporción de oxígeno, el principal mecanismo de pérdida de electrones corresponde a la captura

disociativa, mediante la cual un electrón rompe una molécula de oxígeno pero queda acoplado a uno de sus dos átomos, que se convierte en un ion negativo (Escamilla, 2007).

Reacciones de la ionización por impacto electrónico y la captura disociativa característica en los eventos luminosos transitorios (Luque and Vázquez, 2013).



En las cuales k_4 y k_5 son las constantes cinéticas, que determinan las velocidades respectivas de las reacciones anteriores.

Para dar continuidad a la descripción de la acción de los electrones entre las regiones de fuerte ionización dentro del sprite, es necesario conocer las principales reacciones que determinan la densidad de electrones libres en el aire (Bailey, 2010). Además de ionizar moléculas o sufrir capturas disociativas, los electrones libres del aire también pueden chocar con moléculas de nitrógeno y oxígeno y con ello excitarlas a niveles energéticos superiores (Luque and Vázquez, 2013).

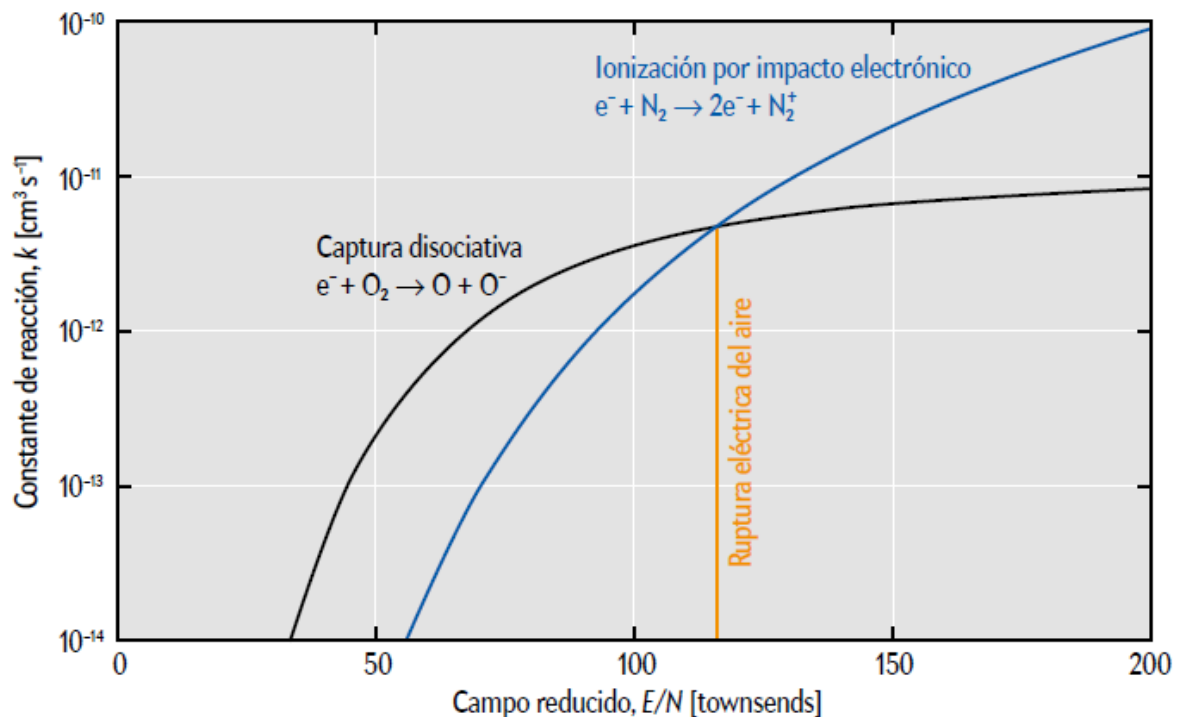
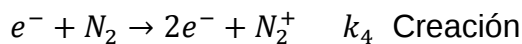
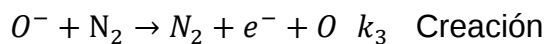
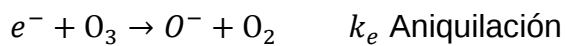


Figura 6. Reacciones de la ionización por impacto electrónico y la captura disociativa (Luque and Vázquez, 2013).

Las principales reacciones que determinan la densidad de electrones libres en el aire y, por tanto, la respuesta electrónica del mismo, son la ionización por impacto electrónico que libera nuevos electrones y la captura disociativa que los inmoviliza (Luque and Vázquez, 2013). El campo eléctrico (E) por encima del cual se domina la ionización y el aire se torna un buen conductor, se denomina de ruptura. Puesto que la energía de los electrones libres de la atmosfera es proporcional al cociente entre el campo eléctrico y la densidad de moléculas del aire (N), suele hablarse de campo eléctrico reducido (E/N) expresado en Townsend(Escamilla, 2007).

2.2.3 Cinética de las reacciones en que intervienen electrones para los TLEs.

La ecuación cinética de las reacciones de especies oxigenadas ocurren en los sprites y las reacciones de la ionización por impacto electrónico y las capturas disociativa para los eventos luminosos transitorias. Estas reacciones son descritas por ecuaciones diferenciales de velocidad de las reacciones químicas, para las concentraciones de electrones $[e^-]$ respecto al tiempo. Dado el conjunto de reacciones:



Representadas por la ecuación cinética:

$$-\frac{d[e^-]}{dt} = k_e[e^-][O_3] + k_4[e^-][N_2] + k_5[e^-][O_2] - k_3[e^-][N_2][O]$$

$$-\frac{d[e^-]}{dt} = [e^-](k_e[O_3] + k_4[N_2] + k_5[O_2] - k_3[N_2][O])$$

2.3 Modelo General

El modelo general que se propone sea capaz de describir la influencia que tienen los eventos luminosos transitorios, así como otros fenómenos de naturaleza eléctrica y estado de agregación plasmático sobre el ozono estratosférico de forma general y especialmente sobre la capa de ozono está dado por un compendio de ecuaciones diferenciales de reacciones químicas. Estas reacciones químicas son las que aparecen en el ciclo de formación y destrucción de ozono propuesto por Sydney Chapman, que comprende dos ecuaciones diferenciales de para las respectivas concentraciones de ozono y oxígeno.

Además de una ecuación diferencial para la concentración de electrones a partir de las reacciones para especies plasmáticas en las que intervienen electrones. Esta estaría dada por las reacciones de especies oxigenadas que ocurren en los sprites en la que intervienen electrones y las reacciones de ionización por impacto electrónico y la captura disociativa característica en los eventos luminosos transitorios (Luque and Vázquez, 2013). De esta manera se formaría un modelo para el ozono estratosférico, en el que se podría predecir la influencia que sufriría este con la acción de los eventos luminosos transitorios, más específicamente de los sprites, constituido por tres ecuaciones diferenciales de la cinética de las reacciones químicas antes expuestas:

$$\frac{d[O]}{dt} = 2jO_2[O_2] - k_1[O][O_2][M] + jO_3[O_3] - k_2[O][O_3]$$

$$\frac{d[O_3]}{dt} = k_1[O][O_2][M] - jO_3[O_3] - k_2[O][O_3]$$

$$-\frac{d[e^-]}{dt} = k_e[e^-][O_3] + k_4[e^-][N_2] + k_5[e^-][O_2] - k_3[e^-][N_2][O]$$

Para el modelo a proponer se pretende igualar las ecuaciones anteriores a cero:

$$0 = 2jO_2[O_2] - k_1[O][O_2][M] + jO_3[O_3] - k_2[O][O_3]$$

$$0 = k_1[O][O_2][M] - jO_3[O_3] - k_2[O][O_3]$$

$$0 = k_e[e^-][O_3] + k_4[e^-][N_2] + k_5[e^-][O_2] - k_3[e^-][N_2][O]$$

Y a partir de esto, el objetivo es procesar las ecuaciones con el empleo del Software Wolfram Mathematica 10.1 para obtener valores críticos de estas y graficas de su comportamiento para a partir de estas describir cómo influyen estos componentes electrónicos de estos fenómenos sobre el ozono. El modelo a proponer es un modelo que sigue la dinámica de poblaciones de especies químicas .La Dinámica de Poblaciones de especies químicas es una parte de la Química Física que estudia las interacciones entre las partículas que conforman los diferentes sustancias que intervienen en una reacción química y también los estudios sobre transporte y difusión de las sustancias químicas en un sistema o en la naturaleza. Su objetivo es el análisis de los procesos químicos desde una dimensión evolutiva, es decir, se encarga del estudio de la materia en el proceso de cambio químico y las causas de dichos procesos (Abramson, 2014) .

CAPÍTULO 3. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

En este capítulo se exponen los resultados del modelo antes expuesto, que consta de tres ecuaciones diferenciales de las reacciones químicas del Ciclo de Chapman, una ecuación para la concentración de oxígeno y otra para la concentración de ozono, para las condiciones específicas de la estratosfera terrestre a alturas comprendidas entre los 10 y 45 kilómetros de altura, respectivamente sobre el nivel del mar teniendo picos máximos de concentración en alturas entre los 18 y 25 kilómetros de altura.

Además de estas dos ecuaciones, el modelo consta de una tercera ecuación que representa la concentración de electrones que ocurre en los eventos luminosos transitorios. Característicos de capas superiores de atmósfera terrestre pero que son descargas eléctricas de gran escala que ocurren muy arriba de las nubes de tormentas, o cumulonimbus, dando lugar a un muy amplio rango de eventos de este tipo, como lo son los sprites que son lo que tienen mayor ocurrencia. Son producidas por las descargas rayos positivos entre las nubes y la tierra y la diferencia de potencial que existe entre estas y la ionosfera terrestre (Dennis J. Boccippio et al.). Cuyos filamentos de plasma pueden bajar hasta los 40 km (Francisco José Gordillo Vázquez et al., 2011) y afectar a la variedad alotrópica del oxígeno presente en esta área de la estratosfera. Dejando un cúmulo de electrones libres de reacciones con las especies presentes en esta zona, que son la especies mayoritarias en la atmósfera como el oxígeno y el nitrógeno, así como el ozono estratosférico y un conjunto de iones que surgen de las reacciones fotoquímica y se descomponen en pocos instantes.

Para este modelo:

$$\frac{d[O]}{dt} = 2jO_2[O_2] - k_1[O][O_2][M] + jO_3[O_3] - k_2[O][O_3]$$

$$\frac{d[O_3]}{dt} = k_1[O][O_2][M] - jO_3[O_3] - k_2[O][O_3]$$

$$-\frac{d[e^-]}{dt} = k_e[e^-][O_3] + k_4[e^-][N_2] + k_5[e^-][O_2] - k_3[e^-][N_2][O]$$

3.1 Normalización de parámetros y variables del Modelo

Procesando el modelo descrito por el anterior sistema de ecuaciones diferenciales con el empleo del software Wolfram Mathematica 10.1, como un modelo de dinámica de población de especies químicas, se toman como variables las $[O_3]$, $[O]$ y $[e^-]$ respectivamente. Como expresa la siguiente tabla:

Variables	Nomenclatura	Wolfram Mathematica
Concentración de Oxígeno	$[O]$	V1
Concentración de Ozono	$[O_3]$	V2
Concentración de Electrones	$[e^-]$	V3

Tabla 2. Variables utilizadas en el Modelo.

Para estas variables y en aras de realizar el procesamiento de datos con el Wolfram Mathematica de forma numérica y no así analítica por lo engorroso de los resultados de determinaron cuotas máximas de estos valores, para normalizar estas variables. En el caso de los valores estacionarios, para el caso del primer modelo considerado, (ciclo de Chapman) predicen concentraciones de ozono del orden de 5.24×10^8 . Para el caso de oxígeno atómico las concentraciones estimadas están el orden de 5.28×10^{12} (Rodríguez, 2012). Como se aprecia de estos valores, en las condiciones de trabajo el oxígeno atómico domina sobre el ozono. Este resultado es explicable si tenemos en cuenta de los altos niveles de irradiación en la zona dura del espectro (UV-C) que llegan a esta región de la atmósfera, capaz de disociar con gran efectividad las moléculas de O_2 (Rodríguez, 2012). Y para la concentración de electrones se realizaron estimaciones que nos arrojan valores máximos de sus concentraciones de 0.2×10^5 (Parra, 2014).

Y como parámetros las concentraciones de dióxígeno, del ion oxido y de dinitrógeno, especies que a la altura antes mencionada se encuentran en la atmósfera (Hiraki et al., 2008) .

Según muestra la siguiente tabla:

Parámetros	Nomenclatura	Wolfram Mathematica
Concentración de Dioxígeno	$[O_2]$	P1
Concentración de Dinitrógeno	$[N_2]$	P3
Concentración del ion Oxígeno	$[O^-]$	P2

Tabla.3. Parámetros utilizadas en el Modelo.

En este caso según arrojan datos recogidos por la ChemsSpider, base de datos libre de química y Base de datos NIST Cinética Química Standard Base de Datos de Referencia 17, versión 7.0 (versión web), versión 1.6.8 Versión datos 2015.12.

Una recopilación de los datos cinéticos de reacciones en fase gaseosa consultadas el 3 de mayo de 2016 para las concentraciones de los parámetros:

Parámetros	Nomenclatura	Valores máximos registrados
Concentración de Dioxígeno	$[O_2]$	$6.3 \times 10^{13} \text{ mol/l}^{-1}$
Concentración de Dinitrógeno	$[N_2]$	$5.2 \times 10^{15} \text{ mol/l}^{-1}$
Concentración del ion Oxígeno	$[O^-]$	$7.2 \times 10^7 \text{ mol/l}^{-1}$

Tabla.4. Valores estimados para los parámetros utilizados en el Modelo.

Además de estos parámetros y las anteriores variables están los parámetros j_1 (t) y j_2 (t), son los llamados coeficientes de primer orden de la tasa de fotólisis para el oxígeno y ozono respectivamente, el coeficiente de fotólisis depende de la probabilidad de que un fotón sea absorbido por una molécula determinada (etapa fotoquímica). (Montecinos, 2005). Vemos en este caso que los valores medios son sencillamente, la mitad de los valores máximos obtenidos justo al mediodía. Según Valores de las concentraciones del modelo ampliado (Montesinos, 2005).

coeficientes de fotólisis del O_2	j_{O_2}	j_1	$j_1 = 9.02 \times 10^{-9} \text{ s}^{-1}$
coeficientes de fotólisis del O_3	j_{O_3}	j_2	$j_2 = 8.55 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$

Tabla.5. Valores de los coeficientes de fotólisis utilizadas en el Modelo.

Posteriormente se calcularon las constantes cinéticas que determinan las velocidades respectivas de las reacciones con los datos empleados en el artículo Plasma chemistry of sprite streamers de D. D. Sentman. Y la Base de Datos de Cinética Química IUPAC (D. D. Sentman et al., 2008).

Constantes cinéticas de velocidad de las reacciones	Valor numérico
k_1	$3.4 \times 10^{-13} \text{cm}^{-6} \text{s}^{-1}$
k_2	$3.28 \times 10^{-17} \text{cm}^{-6} \text{s}^{-1}$
k_3	$0.18 \times 10^{-9} \text{cm}^{-6} \text{s}^{-1}$
k_4	$1 \times 10^{-8.3} \text{cm}^{-6} \text{s}^{-1}$
k_5	$1 \times 10^{-9.57} \text{cm}^{-6} \text{s}^{-1}$
k_e	$0.08 \times 10^{-11} \text{cm}^{-6} \text{s}^{-1}$

Tabla.6. Constantes cinéticas de velocidad de las reacciones utilizadas en el Modelo

El hecho de buscar valores estándar de estas variables, a una altura en la que interactúan los eventos luminosos transitorios y el ozono estratosférico es necesario para poder obtener valores reales en el modelo. Ya que si se trabajara de forma analítica no seríamos capaces de obtener respuestas congruentes con la realidad de aquí que con la ayuda de un conjunto de Bases de datos de la Cinética Química (D. D. Sentman et al., 2008) podamos encontrar valores en los que puede tener validez el modelo, siempre teniendo en cuenta las propiedades de este tipo de fenómenos y de la variedad alotrópica del oxígeno, protagonista de este trabajo, así como de las demás especies químicas existentes en los procesos que describe el

modelo. En el artículo antes citado las constantes o coeficientes de velocidad de reacción se encuentran de la forma:

$$k = A(T/300)^B \exp(C/T)$$

Para la cual en el artículo: "Plasma chemistry of sprite streamers" de D. D. Sentman encontramos valores para A, B y C. Estos coeficientes de velocidad de las reacciones químicas es función de la temperatura y de la presión. Algunos científicos emplean el primer término cuando se cree que la reacción es elemental y el último, cuando se sabe que la reacción ocurre en más de una etapa.

Para este trabajo se escogió como altura estándar las comprendidas entre los 30 y 40 kilómetros sobre el nivel del mar, donde confluyen estos fenómenos luminosos y existe una concentración de ozono que se considera relevante para este estudio, se determinó una temperatura promedio de 2.18k.

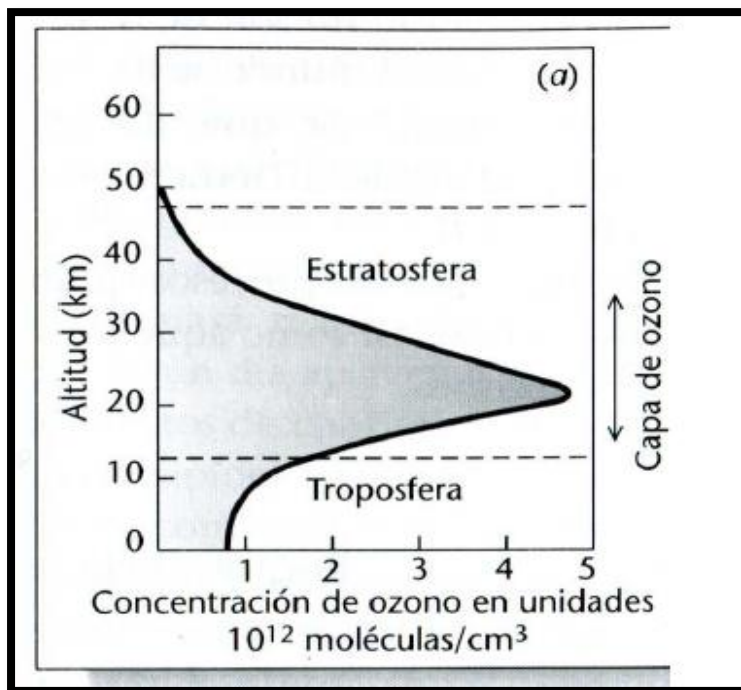


Figura.7. Distribución del ozono en la atmósfera (Luque and Vázquez, 2013). .

3.2 Análisis dinámico del sistema.

En el modelo, la estructura de la dinámica da como resultado un sistema no autónomo, pues el tiempo se encuentra explícito en las ecuaciones. Además, el sistema de ecuaciones diferenciales referido no representa un problema de alta complejidad matemática, por lo que la utilización de un método numérico ordinario

permite obtener fácilmente una representación numérica de las variables del problema. En este caso, la utilización de las herramientas matemáticas aportadas por la teoría del análisis dinámico cualitativo para evaluar la estabilidad del sistema no es imprescindible. El resultado obtenido indica, que el sistema dinámico se mueve atraído por un punto del espacio de fase constituido por los valores (v_2 , v_3). Este punto puede considerarse como un punto de atracción del sistema, aunque el análisis dinámico no se haya realizado, pues la simulación numérica realizada así lo corrobora.

En el campo de la matemática de los sistemas dinámicos, un atractor es un conjunto de valores numéricos, hacia la cual un sistema tiende a evolucionar, en una amplia variedad de condiciones iniciales del sistema. Para que el conjunto sea un atractor, las trayectorias que le sean suficientemente próximas han de permanecer próximas incluso si son ligeramente perturbadas (Pérez, 2013).

Los sistemas dinámicos procedentes de aplicaciones físicas tienden a ser disipativos: si no fuera por alguna fuerza externa el movimiento cesaría. La disipación puede proceder de fricción interna, pérdidas termodinámicas o pérdida de material (Lynch, 2000), como es el caso de este sistema, en que se puede observar una pérdida de la variable concentración de electrones, así como un aumento en la variable concentración de ozono estratosférico en las alturas antes.

3.3 Análisis de los resultados gráficos obtenidos.

Con el empleo del Software Wolfram Mathematica 10.1 y los datos numéricos anteriormente expuestos y normalizados del modelo, el software no da la oportunidad de obtener resultados gráficos.

En un primer gráfico se muestra el incremento significativo que tendría V_2 en el tiempo, siendo V_2 la nomenclatura de la concentración de ozono al interaccionar con un evento luminoso transitorio, específicamente con un sprite, descrito así su funcionamiento con la tercera ecuación del modelo.

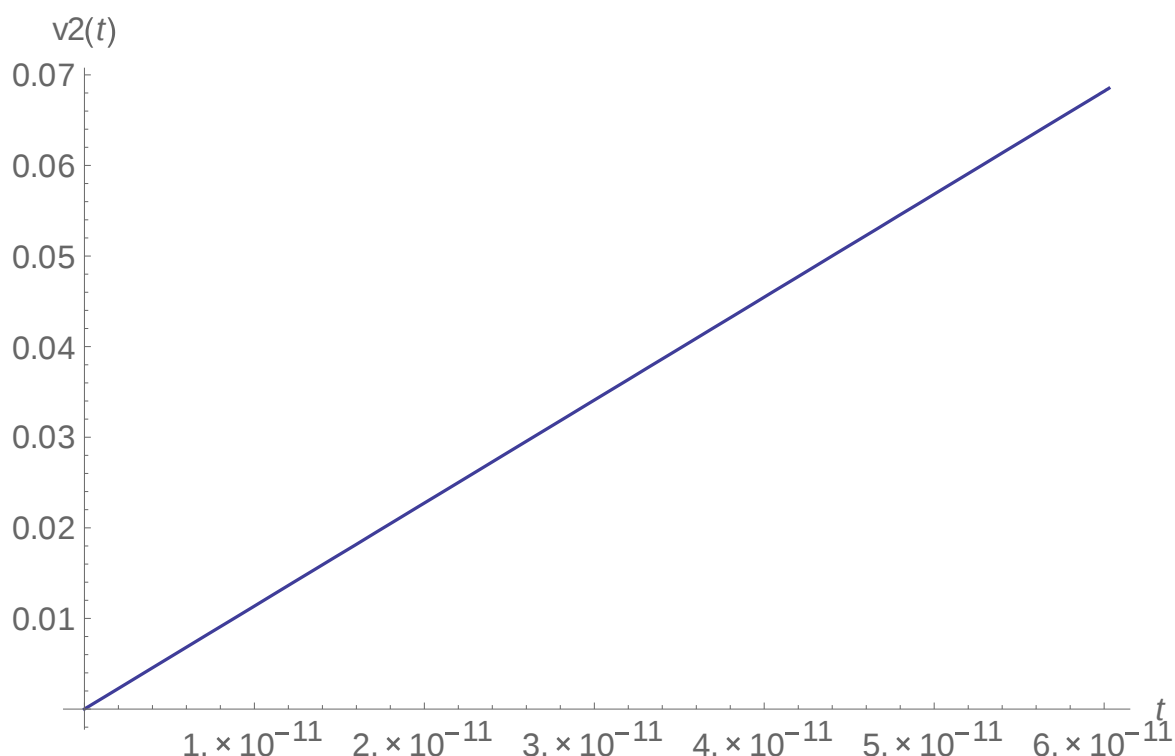


Figura 8. Aumento en la Concentración de Ozono Estratosférico con la ocurrencia de un Sprite, las concentración de ozono están en mol/l^{-1} y el tiempo en segundo

A medida que esto ocurre en un tiempo limitado, que es el que tiene la vida útil de un fenómeno eléctrico de esta naturaleza en estas condiciones. La concentración de electrones se ve disminuida, pues la acción de los electrones entre las regiones de fuerte ionización dentro del sprite son las principales reacciones que determinan la densidad de electrones libres en el aire, que son las capturas disociativas y la ionización por impacto electrónico. Además de ionizar moléculas o sufrir capturas disociativas, los electrones libres del aire también pueden chocar con moléculas de nitrógeno y oxígeno y con ello excitarlas a niveles energéticos superiores (Luque and Vázquez, 2013). Los valores temporales en que ocurren las reacciones son del orden de los pico segundos, pues sus reacciones que ocurren a velocidades nucleares.

Las principales reacciones que determinan la densidad de electrones libres en el aire y, por tanto, la respuesta electrónica del mismo, son la ionización por impacto electrónico que libera nuevos electrones y la captura disociativa que los inmoviliza. A partir de que transcurre el tiempo de vida de un sprite se puede observar un

decremento en la concentración de electrones, representada por la curva de V_3 según la nomenclatura utilizada en el software.

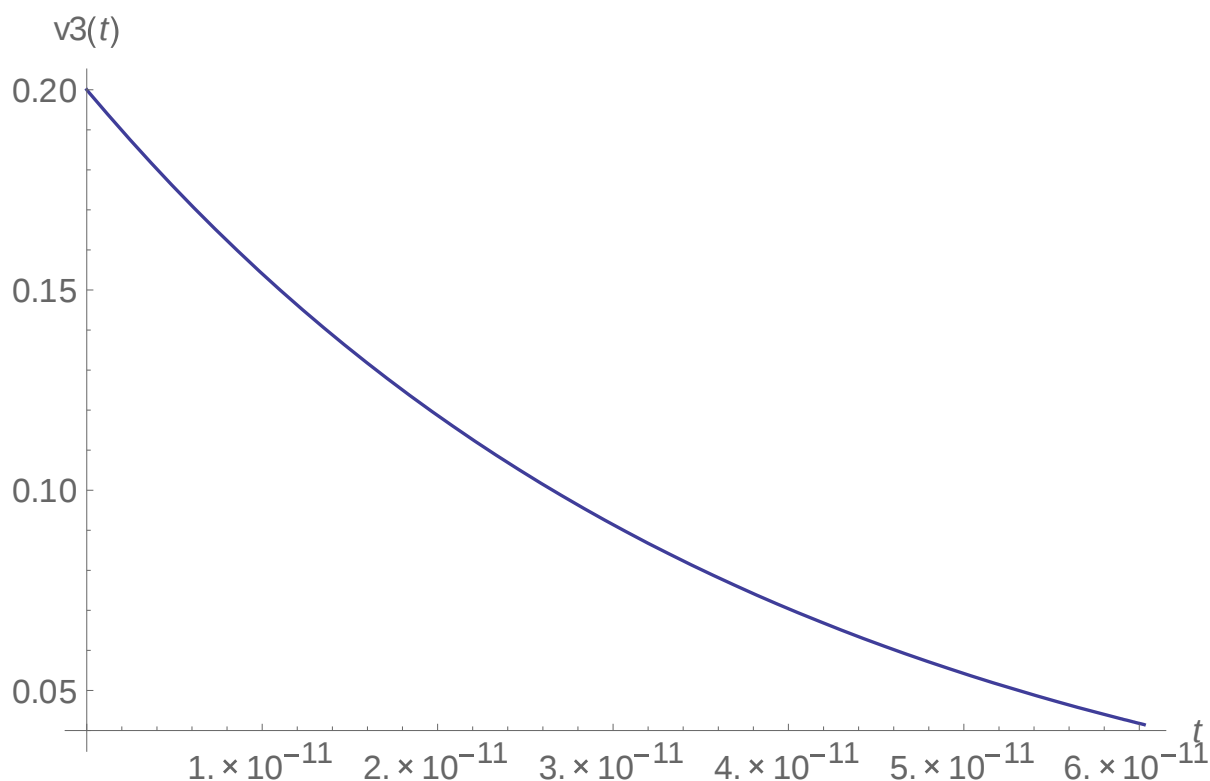


Figura 9. Decremento en la Concentración de electrones libres en la atmosfera con la ocurrencia de un Sprite, las concentración de electrones están en mol/l⁻¹ y el tiempo en segundo

En la siguiente gráfica se puede observar como a medida que transcurre un sprite, disminuye la concentración de electrones significativamente, ya que con la acción de ionizar las moléculas de nitrógeno y oxígeno el principal mecanismo de pérdida de electrones corresponde a la captura disociativa, característica de los sprites así como para alturas menores en la atmosfera el desprendimiento asociativo (Luque and Vázquez, 2013). En esta gráfica también se puede apreciar, el significativo aumento que tiene el Ozono estratosférico de forma natural con la rápida ocurrencia de un sprite y se puede predecir este aumento de la concentración de ozono según el tiempo de vida útil que tienen las reacciones químicas que engendra un sprite.

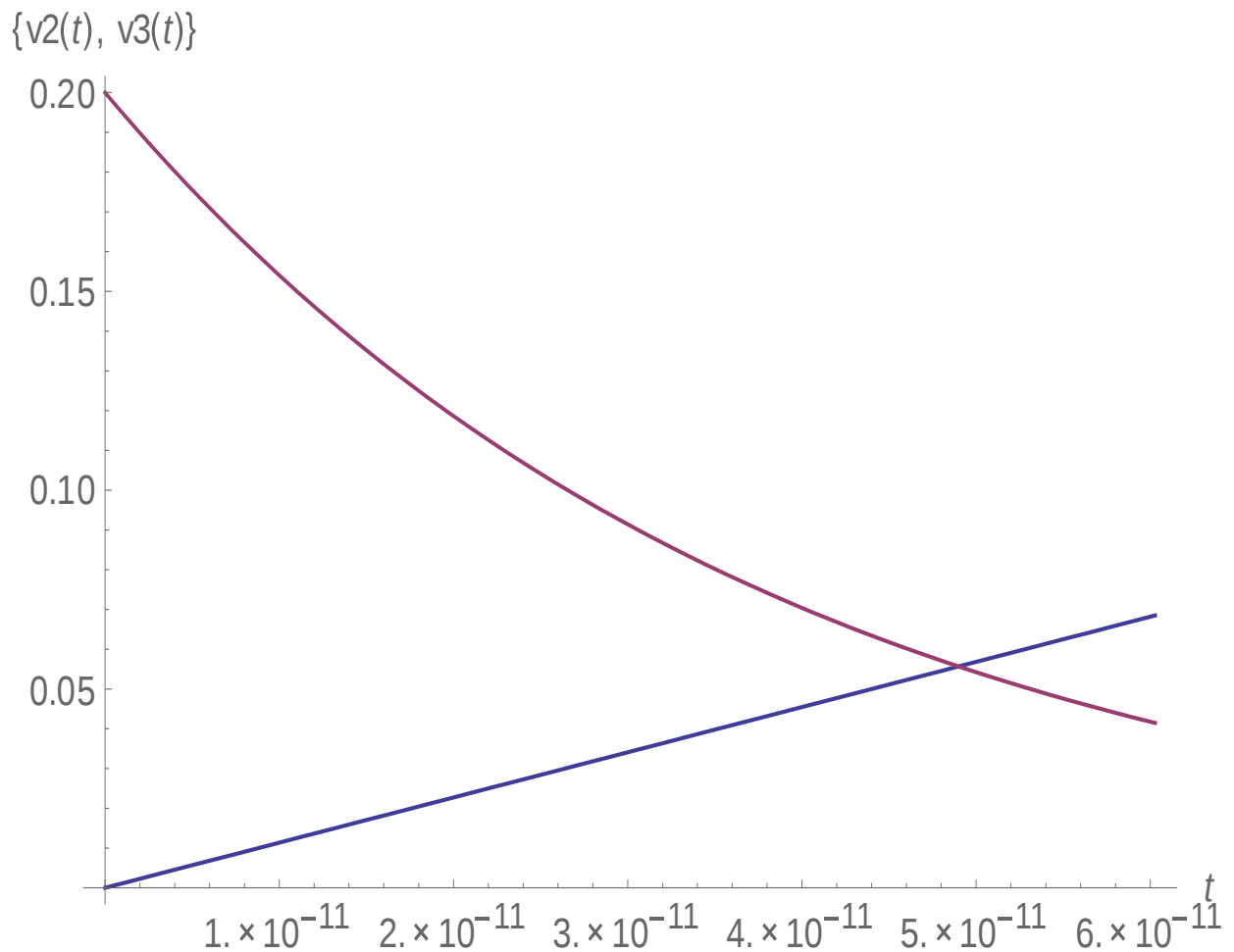


Figura 10. Correlación temporal entre las concentraciones de electrones V3 y de ozono V2 con la ocurrencia de un sprite. Las concentraciones de ozono y electrones están en mol/l^{-1} y el tiempo en segundo.

En el momento en que graficamos la acción que tiene V2 Y V3 en una misma gráfica, podemos observar como a medida que de forma rápida disminuye la concentración de electrones, aumenta no de igual manera, pero sí de forma significativa la concentración de ozono. Concluyéndose que estamos en presencia de un punto de atracción del sistema

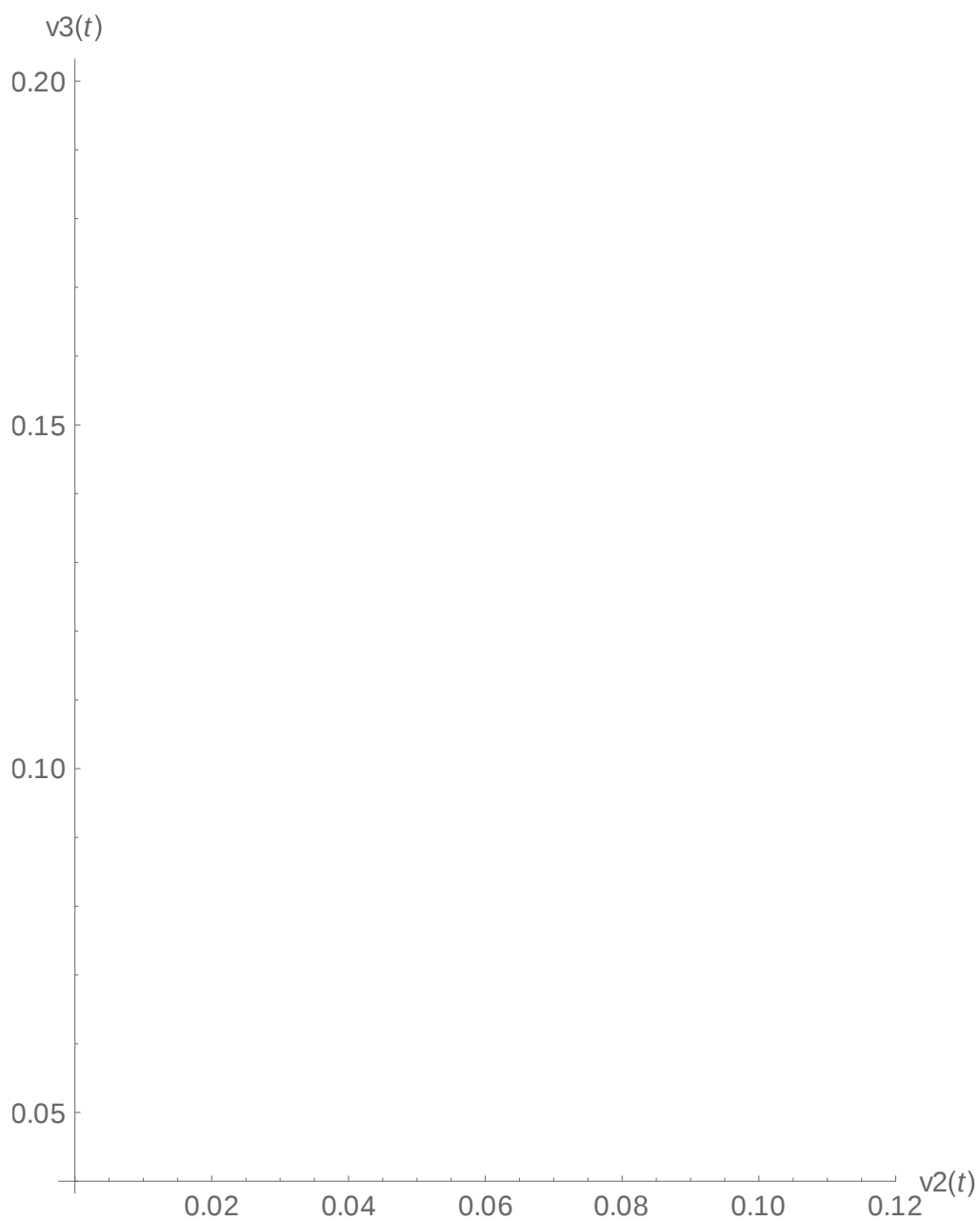


Figura.11. Comportamiento temporal entre las concentraciones de electrones V3 y de ozono V2 con la ocurrencia de un sprite. Las concentraciones de ozono y electrones están en mol/l^{-1} y el tiempo en segundo

Conclusiones:

- Se creó un modelo que demuestra matemáticamente que con la ocurrencia de un evento luminoso transitorio específicamente un sprite se pueden observar cambios en la dinámica del ozono estratosférico, en el que aparece un incremento significativo de la concentración de ozono de forma natural.

Recomendaciones:

- Utilizar un mayor número de ecuaciones que describan la acción de los eventos luminosos transitorios en el modelo en aras de hacer más real las predicciones del mismo.
- Realizar una búsqueda extensiva de los valores de parámetros, variables y constantes utilizadas en el modelo así como de unidades de medidas más convenientes y realizar este estudio en las diferentes capas de la atmosfera terrestre en las que la utilización de este modelo sea relevante.

Referencias Bibliográficas:

- ABRAMSON, G. 2014. *La matemática de los sistemas biológicos*. Instituto Balseiro.Universidad Nacional de Cuyo - CNEA.
- ARNONE, E., BERG, P., ARNOLD, N. F., CHRISTIANSEN, B. & THEJLL, P. 2008. An estimate of the impact of transient luminous events on the atmospheric temperature. *Advances in Geosciences*.
- BAILEY, M. A. 2010. *Investigating Characteristics of Lightning-Induced Transient Luminous Events Over South America*. DOCTOR OF PHILOSOPHY, Utah State University.
- CHENG, Z., CUMMER, S. A., BAKER, D. N. & KANEKAL, S. G. 2006. Nighttime D region electron density profiles and variabilities inferred from broadband measurements using VLF radio emissions from lightning. *JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH*, VOL. 111.
- D. D. SENTMAN, H. C. STENBAEK-NIELSEN, M. G. MCHARG & MORRILL3, J. S. 2008. Plasma chemistry of sprite streamers. *JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH*, VOL. 113.
- DENNIS J. BOCCIPPIO, EARLE R. WILLIAMS, STAN J. HECKMAN, WALTER A. LYONS, IAN T. BAKER & BOLDI, R.1995. Sprites, ELF Transients, and Positive Ground Strokes. *Science*, 269.
- ESCAMILLA, S. G. 2007. *Estudios del Transporte Ionización y Captura Electrónica en N2. O2 y CO2*. Trabajo de Diploma, Universidad Nacional Autónoma de México.
- FLEMING, H. P., MUÑOS, P., VALENZUELA, E. & CASTELLANO, J. 2008. Óxido nítrico en los fiordos de Chile. *Cienc. Tecnol. Mar*, 31 (2): 45-73, 2008.
- FRANCISCO JOSÉ GORDILLO VÁZQUEZ, LUQUE, A., PARRA, F. C. & PASSAS, M. 2011. Plasmas en atmósferas planetarias. *Revista Española de Física*, 25-3, 8.
- GERKEN, E. A., INAN, U. S. & BARRINGTON-LEIGH, C. P. 2000. Telescopic imaging of sprites. *GEOPHYSICAL RESEARCH LETTERS*, VOL. 27, NO. 17.
- GINER, J. M. E. 2013. *“Investigación de los mecanismos de modificación superficial en ionómeros mediante la utilización de tecnologías de plasma atmosférico”*. Tesis Doctoral, UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA.
- GONZÁLEZ-ELIPE, A. R., GORDILLO-VÁZQUEZ, F. J., TABARÉS, F. L. & TANARRO, I. 2013. Plasmas fríos moleculares. Química de plasmas. *Revista Española de Física*.
- GORDILLO-VÁZQUEZ, F. J. 2008. Air plasma kinetics under the influence of sprites. *JOURNAL OF PHYSICS D: APPLIED PHYSICS*, 33.
- GORDILLO-VAZQUEZ, F. J. & LUQUE, A. ´2013. Preface to the Special Issue on Thunderstorm Effects in the Atmosphere–Ionosphere System. *Surv Geophys*.
- GREEN, B. D., FRACER, M. E., RAWLIN, W. T. & BLUMBERG, W. A. M. 1996. Molecular excitation in Sprites. *Geophysica Research Letters*, 23.
- HEAVNER, M. J. 2000. *Optical spectroscopic observation of Sprites, Blue jets, and Elves: inferred microphysical processes and their macrophysical implications*. . DOCTOR OF PHILOSOPHY University of Alaska Fairbanks.
- HIRAKI, Y., KASAI, Y. & FUKUNISHI, H. 2008. Chemistry of sprite discharges through ion-neutral reactions. *Atmospheric Chemistry and Physics*.
- HOFFMAN, M. J. 2005. *Hoffman, Matthew J. Ozone Depletion and Climate Change*.

- KOSSYI, I. A., KOSTINSKY, A. Y., MATVEYEV, A. A. & SILAKOV, V. P. 1992. Kinetic scheme of the non-equilibrium discharge in nitrogen-oxygen mixtures. *IOPscience*.
- LOPEZ, S. G. 2006. *Determinación del Ozono Atmosférico de las medidas de MIPAS/ENVIST*. Doctor en Ciencia Físicas, Universidad de Granada
- LUQUE, A. & EBERT, U. 2011. Electron density fluctuations accelerate the branching of positive streamer discharges in air. *PHYSICAL REVIEW*.
- LUQUE, A. & GORDILLO-VÁZQUEZ, F. J. 2012. Mesospheric electric breakdown and delayed sprite ignition caused by electron detachment. *Nature Geoscience*.
- LUQUE, A., RÍO, J. S. D., VÁZQUEZ, F. J. G., CLARET, A. & FERNÁNDEZ, J. L. G. 2010. Descargas en la Alta Atmosfera.
- LUQUE, A. & VÁZQUEZ, F. J. G. 2013. Duendes, elfos y Chorros Azules. *investigacion y ciencia*, 69.
- LYNCH, S. 2000. *Dynamical Systems with Applications using Mathematica*, www.birkhauser.com.
- MARKOSYANA, A. H., LUQUE, A., GORDILLO-VÁZQUEZ, F. J. & EBERT, U. 2014. PumpKin: A tool to find principal pathways in plasma chemical models. *Computer Physics Communications*.
- MCCARTHY, K. J., SOLA, A., ANABITARTE, E., BORDE, N., COTRINO, J., GÓMEZ-ALEIXANDRE, C., VÁZQUEZ, F. J. G., MAR, S., MARTÍNEZ, R., PRIETO, G. R., TANARRO, I. & BUENOXII, J. T. 2013. Desarrollo de diagnósticos para plasmas: catalizador de nueva física. *Revista Española de Física*.
- MILÁNTIEV, V. & TEMKO, S. 1987. *Física del Plasma*.
- MONTECINOS, S. 2005. Determinación del coeficiente de fotodisociación del ozono.
- NOTHOLT, J. & WINKLER, H. 2014. A model study of the plasma chemistry of stratospheric Blue Jets. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, November 2014
- PARRA-ROJAS, F. C., LUQUE, A. & GORDILLO-VÁZQUEZ, F. J. 2015. Chemical and thermal impacts of sprite streamers in the Earth's mesosphere. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*.
- PARRA, W. A. G. 2014. *Cálculo del Contenido Total de Electrones-TEC, para la Ionósfera Colombiana*. Magíster en Ciencias - Física, Universidad Nacional de Colombia Facultad de Ciencias, Departamento de Física.
- PASKO1, V. P. 2010. Recent advances in theory of transient luminous events. *JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH*.
- PASSAS, M., RÍO, J. S. D., ALEJANDRO LUQUE & GORDILLO-VÁZQUEZ, F. J. 2014. Transient Upper Atmospheric Plasmas: Sprites and Halos. *IEEE TRANSACTIONS ON PLASMA SCIENCE*.
- PEREYRA, A. 2009. Electricidad. Tormentas Eléctricas.: Instituto de Física del Plasma (INFIP).
- PÉREZ, J. C. J. 2013. *Caracterización de los atractores en sistemas dinámicos no autónomos*. Doctor en Matemáticas Universidad de Sevilla.
- RODRÍGUEZ, Y. E. 2012. *Dinámica del ozono bajo diferentes regímenes de forzamientos*. Trabajo de Diploma, Universidad Central "Marta Abreu" de las Villas.
- ROJAS, F. C. P. 2015. *Electrical discharges in planetary upper atmospheres: thermal and chemical effects*. Philosophi Doctor (PhD), Universidad de Granada

- SABORIT, J. M. D. 2005. *Validación e implementación de técnicas de capacitación pasivas para el estudio de los niveles y efectos del Ozono troposférico y dióxido de nitrógeno en un área costera mediterránea*. Universitat Jaume I.
- SÁNCHEZ, N. S. R. & QINTANA, N. M. R. 2012. Mapa de Riesgo Ionosférico. Administrativa Especial de Aeronautica Civil. Colombia
- SERWAY, R. A. & FAUGHN, J. S. 2011. *Fundamentos de física 2*.
- SINGH, D., SINGH, A. K., PATEL, R. P., SINGH, R. & SINGH, R. P. 2011. Thunderstorms, lightning, sprites and magnetospheric whistler-mode radio waves. *Indian Institute of Tropical Meteorology*.
- SOLOMON, S. 1999. Stratospheric ozone depletion: a Review of Concepts and History. *REVIEWS OF GEOPHYSICS, Aeronomy Laboratory, NOAA R/E/AL8, National Oceanic and Atmospheric Administration*, 24.
- TORRES, R. E. G. 2000. Formación de ozono por descargas eléctricas atmosféricas. *Meteorología Colombiana*, 1 Marzo.
- WILLIAMS, E. R. 2011. Sprites, elves, and glow discharge tubes. *Physics Today*, 54.
- WINKLER, H. & NOTHOLT, J. 2014a. The chemistry of daytime sprite streamers – a model study. *H. Winkler and J. Notholt*, 12.
- YAIR, Y. 2012. New results on planetary lightning. *Advances in Space Research*.
- ZANÓN, M. P. 1996. Acerca del «agujero» de ozono en la estratosfera Antártica. *Real Academia de Ciencias y Artes de Barcelona*.