

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA

Facultad de Ciencias y Humanidades

Cuantificación de la cantidad de ozono (O_3) en la estratosfera utilizando la técnica UV DIAL (LIDAR de absorción diferencial ultravioleta).

Trabajo de graduación presentado por Marcelo Velásquez para obtener el título de Licenciado en Física.

Guatemala
2003

Quantificación de la cantidad de oro (O) en la
estratificación utilizando la técnica UV-DIC. (LIDAR de
absorción diferencial ultravioleta).

Cuantificación de la cantidad de ozono (O_3) en la estratosfera utilizando la técnica UV DIAL (LIDAR de absorción diferencial ultravioleta).

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA

Facultad de Ciencias y Humanidades

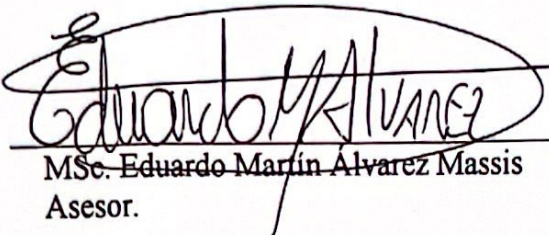
Cuantificación de la cantidad de ozono (O_3) en la estratosfera utilizando la técnica UV DIAL (LIDAR de absorción diferencial ultravioleta).

BIBLIOTECA
DE LA
UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA

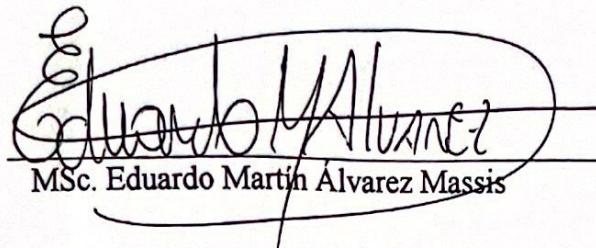
Trabajo de graduación presentado por Marcelo Velásquez
para obtener el título de Licenciado en Física.

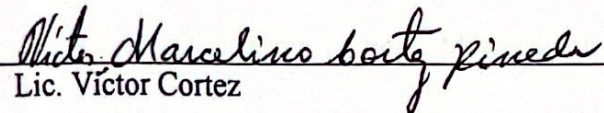
Guatemala
2003

Vo. Bo.:

(f) 
MSc. Eduardo Martín Álvarez Massis
Asesor.

Tribunal:

(f) 
MSc. Eduardo Martín Álvarez Massis

(f) 
Lic. Víctor Cortez

(f) _____
MSc. Carlos Salvado.

Fecha de aprobación: 31 de octubre del 2003.

Dedicatoria.

A mis padres: Marcelo y Luz Marina.

A mi Hermana: Liza María.

Al Departamento de Física de la
Universidad del Valle de Guatemala.

A todos los investigadores que se esfuerzan
en proteger nuestro planeta Tierra.

AGRADECIMIENTO

Al asesor MSc. Eduardo Martín Álvarez Massis, por su valiosa orientación e interés en la realización de dicha investigación.

Al Professor Dr. Paul O'Scheie, Jefe del Departamento de Física de Texas Lutheran University por su cooperación y orientación en el uso del láser en el Laboratorio.

Al personal del museo de la ciencia de la NASA en Houston, que compartieron información a mis inquietudes profesionales.

Y a todas las personas que colaboraron de una u otra forma para llegar a la conclusión de esta tesis.

CONTENIDO

		Página
	AGRADECIMIENTO	vii
	LISTADO DE CUADROS	ix
	LISTADO DE ILUSTRACIONES	x
	RESUMEN	xi
I.	INTRODUCCIÓN	1
II.	Objetivos	2
II.1	Objetivo general	2
II.2	Objetivos específicos	2
III.	MARCO TEÓRICO	
	3.1 La contaminación ambiental	3
	3.2 La atmósfera	3
	3.2.1 La troposfera	5
	3.2.2 La estratosfera	5
	3.2.3 La mesosfera	5
	3.2.4 La termosfera	5
	3.2.5 Más allá de la atmósfera	5
	3.3 La contaminación de la estratosfera	5
	3.3.1 El ozono(O ₃) atmosférico	8
	3.3.2 Cuantificación del ozono estratosférico	10
	3.3.3 Tipos de radiación ultravioleta	11
	3.4 El láser	12
	3.4.1 Tipos de láser	12
	3.4.1.1 Láser de gas	12
	3.4.1.2 Láser líquido	18
	3.4.1.3 Láser de estado sólido	18
	3.4.1.4 Láser especiales	21
	3.5 Principios de detección de luz y enfoque con láser(LIDAR)	22
	3.5.1 La ecuación del LIDAR	25
	3.5.2 Sistema LIDAR y equipo	27
	3.5.3 Seguridad ocular	32
	3.5.4 Interacciones atmosféricas que determinan la señal recibida del LIDAR	33
	3.5.4.1 Dispersión elástica de retroceso	33
	3.5.4.2 Atenuación	37
	3.5.5 Técnica LIDAR de absorción diferencial	38
	3.5.5.1 Principio de operación	39
	3.5.5.2 Medición de la sensibilidad	40
	3.5.5.3 Errores potenciales	43
	3.6 Interpretación del LIDAR de los valores de cuantificación del ozono(O ₃) de la estratosfera	45
	3.6.1 El sistema DIAL aerotransportado	45
	3.6.2 El sistema DIAL con base en el espacio	48
	3.7 Capacidades de monitoreo remoto de los sistemas de láser	49
	3.7.1 Sistemas de un extremo	50
	3.7.2 Sistemas de dos extremos	51
IV.	METODOLOGÍA DE INVESTIGACIÓN	53
V.	DISCUSIÓN DE RESULTADOS	54
VI.	CONCLUSIONES	59
VII.	RECOMENDACIONES	60
VIII.	BIBLIOGRAFÍA	61

LISTADO DE CUADROS

Cuadro		Página
1.	Especificaciones de tres sistemas LIDAR de investigación	31
2.	Concentraciones detectables mínimas de varios gases atmosféricos usando la técnica de LIDAR de absorción diferencial	43
3.	Parámetros del sistema UV DIAL aerotransportado Langley de la NASA	46
4.	Parámetros del sistema y objetivos de desempeño para un sistema satelital DIAL de ozono	49
5.	Contribuciones significativas del sistema UV DIAL aerotransportado, para el conocimiento de la troposfera y estratosfera.	55
6.	Técnicas de dispersión del LIDAR	57

LISTADO DE ILUSTRACIONES

Ilustración	Página
1. Nomenclatura atmosférica y cambios de temperatura	4
2. Composición de la atmósfera	4
3. Perfil vertical del ozono en la atmósfera	11
4. Diagrama de niveles de energía del láser He-Ne.	13
5. Modos de oscilación de la molécula de CO ₂	15
6. Diagrama del nivel de energía del láser de nitrógeno	16
7. Diagrama de los niveles de energía del láser del ión de argón	17
8. Diagrama de los niveles de energía del láser de Alejandrita	20
9. Diagrama esquemático de la configuración fundamental del LIDAR, con geometría coaxial de transmisor/receptor.	23
10. La fotografía de la pantalla de un osciloscopio, muestra la pendiente intensidad vs. distancia de las señales de LIDAR recibidas.	24
11. La fotografía de la pantalla de un osciloscopio muestra la intensidad modulada del LIDAR	25
12. Localización y longitud del incremento en alcance de donde las señales de LIDAR son simultáneamente recibidas en el tiempo t	26
13. Un sistema LIDAR avanzado	30
14. Muestra la fotografía de una porción del sistema LIDAR SRI Mark IX.	30
15. Diagrama esquemático mostrando un compacto radar láser dye	32
16. La técnica del LIDAR de absorción diferencial	38
17. Diagrama de bloques de la configuración del sistema UV DIAL para operar en aeronaves	47
18. Ejemplo de mapa atmosférico.	47

RESUMEN

Uno de los requisitos de la Universidad del Valle de Guatemala para la obtención del grado de Licenciado en Física, consiste en la elaboración de un proyecto de investigación original que sea una contribución personal a la ciencia.

La contaminación es una de las posibles causas que inciden en los cambios drásticos en la concentración del ozono O_3 , misma que se ha incrementado en el siglo veinte y es una posible consecuencia de los cambios en los diferentes ecosistemas.

Se planteó la investigación con el objetivo de generar información acerca de la aplicación y uso de la técnica UV DIAL (LIDAR de Absorción Diferencial Ultra Violeta para la medición del ozono O_3) que existe en la estratosfera.

El láser es uno de los aportes más importantes en la tecnología del siglo XX, éste inició un renacimiento de la ciencia y tecnología en el campo de la óptica. El impacto del láser en la investigación es por las propiedades de amplificar la luz y de ser: monocromática, coherente y de alta intensidad.

De acuerdo a la investigación bibliográfica y a otras fuentes, la técnica LIDAR de Absorción Diferencial puede utilizarse para cuantificar una amplia gama de componentes gaseosos específicos y con una alta sensibilidad. La técnica puede ser usada para obtener una trayectoria integrada de concentración de materia gaseosa, al medir la señal desde un objetivo remoto fijo hasta cierto alcance atmosférico resuelto.

Las concentraciones mínimas que se reportan (Tabla 5.2) indican que la técnica de absorción diferencial, puede utilizarse para medir la concentración de varios gases atmosféricos a niveles de ambiente urbano; en regiones en las cuales están separadas por varios kilómetros del LIDAR detector.

Para cuantificar ozono, vapor de agua así como también aerosol se tiene como referencia el uso del LIDAR de Absorción diferencial Ultra Violeta por medio de dos sistemas: El Aerotransportado que se inicia en 1980 y el Espacial por medio de satélite que comienza a desarrollarse a finales de 1994. La capacidad del equipo del UV DIAL aerotransportado y del espacial (satelital), para investigación permite analizar la química y composición de la atmósfera, para ayudar a otros instrumentos que se usan en forma separada. Ambos sistemas utilizan la escala colorimétrica (Fig .6.1) donde el color rozado indica la baja concentración y el negro la alta concentración del ozono en la atmósfera. El UV DIAL permite estudiar el ozono en la troposfera y en la estratosfera, además permite estudiar los efectos en la atmósfera de la quema de biomasa y como la polución se transporta a grandes distancias.

La utilización de los sistemas UV DIAL Aerotransportado y Espacial, es posible implementarla para las condiciones de Guatemala, a través de programas cooperativos de investigación con instituciones de otros países que dedican atención al estudio de la capa de ozono y a la polución en la atmósfera.

I. INTRODUCCIÓN

La investigación se desarrolló mediante información acerca de la aplicación y uso de la técnica UV DIAL(LIDAR de absorción diferencial ultra violeta) para la medición del ozono(O_3) que existe en la estratosfera.

Los cambios drásticos en la concentración del ozono que se han incrementado en el siglo veinte han propiciado disturbios ecológicos con repercusiones en la existencia de la vida.

El incremento en la magnitud del crecimiento de las ciudades en los países desarrollados, así como también en los países en vías de desarrollo, es consecuencia colateral a la adopción de tecnología y el uso de recursos en los países desarrollados. Estos están deteriorando en forma alarmante el ecosistema y están propiciando e incrementando la contaminación con daño y repercusiones en la capa de ozono de la estratosfera.

En esta investigación se pretende generar información técnica al respecto de la utilización de la técnica UV DIAL para la cuantificación del ozono en la estratosfera y exponer en una forma clara qué es el LIDAR(rango y detección de luz), la experiencia en su utilización para la cuantificación del ozono, con énfasis en su posible utilización en Guatemala. Es útil para el monitoreo secuencial en el tiempo de los valores de la presencia del ozono, para indicar los índices de contaminación ambiental; para poder considerar la utilización del LIDAR en los estudios para el monitoreo del ozono y contribuir a evitar el deterioro de la estratosfera y troposfera.

II. OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GENERAL

Esta investigación bibliográfica pretende desarrollar información técnica con respecto a la utilización de la técnica UV DIAL(LIDAR de absorción diferencial ultra violeta),para la determinación de valores cuantificables de la presencia de ozono O₃ en la estratosfera.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Desarrollar información técnica específica con respecto a la utilización de la técnica UV DIAL para la cuantificación de ozono O₃ en la estratosfera.

Desarrollar información a través de la revisión bibliográfica para el conocimiento de los principios en que se basa el LIDAR (rango y detección de luz), y su utilización.

III. MARCO TEÓRICO

3.1. *La contaminación ambiental*

La palabra contaminación según Odum(1978:257) se deriva de la raíz griega que significa "corromper". La Academia Nacional Waste Management and Control(administración y control de desechos), define la contaminación como un cambio indeseable en las características físicas, químicas o biológicas del aire, agua o tierra, que será o puede ser perjudicial para el hombre y otras formas de vida, procesos industriales, condiciones de vida y propiedades culturales. De acuerdo con Miller(1994:15) la mayoría de los contaminantes son sustancias químicas sólidas, líquidas o gaseosas producidas como subproductos o desechos, cuando un recurso es extraído, procesado, transformado en productos y utilizado. Según a Odum(1978:257) a la contaminación se le considera en un sentido amplio como el desorden termodinámico que es el producto derivado de la conversión de energía y el uso de los recursos.

Según Somerville(1996:1) el clima del planeta Tierra no es constante y es cambiante, variando naturalmente desde que la Tierra existe y no es simple retardarlo o revertirlo. Esto a causa de industrias, estilos de vida y usos de energía que han cambiando dramáticamente el ritmo de vida en los humanos, lo que ha afectado al planeta en escala global. Como una consecuencia tenemos: el agujero de ozono y la disminución dramática de la capa de ozono estratosférico sobre la Antártica. Así como los aspectos globales del efecto invernadero, lluvia ácida y contaminación en el aire entre otros.

Según Da Silva(1997:Internet) actualmente el agujero de ozono sobre el continente antártico se considera como uno de los problemas ambientales más graves al que nos enfrentamos en este momento. El daño de la capa de ozono fue detectado hace dos décadas; desde entonces se han realizado estudios sistemáticos utilizando distintos métodos: satélites, ozono-sondas y estaciones terrestres.

Se ha demostrado que la radiación UV-B puede producir daño en los seres vivos, dependiendo de su intensidad y tiempo de exposición. Estos daños pueden abarcar desde eritemas a la piel, conjuntivitis y deterioro en el sistema de defensas, hasta afectar el crecimiento de las plantas y dañando el fitoplancton, con las posteriores consecuencias que esto ocasiona para el normal desarrollo de la fauna marina.

3.2 *La atmósfera*

De acuerdo a Phillips(1995: Internet) el planeta Tierra está rodeado por una capa de aire, a la cual llamamos la atmósfera. Esta se extiende 560 kilómetros sobre la superficie de la Tierra.

La diversidad de formas de vida en la Tierra el desarrollo y coevolución es mantenida por la atmósfera, la energía solar y los campos magnéticos de nuestro planeta. La atmósfera absorbe la energía del Sol, recicla agua y otros químicos, y trabaja con las fuerzas eléctricas y magnéticas para proveer un clima moderado. La atmósfera también nos protege de la radiación de alta energía y del helado vacío del espacio.

La envoltura de gas que rodea la Tierra varía desde la parte más baja. Cuatro capas distintas han sido identificadas con base a características termales (cambios de temperatura), composición química, movimiento y densidad: troposfera, estratosfera, mesosfera y termosfera.

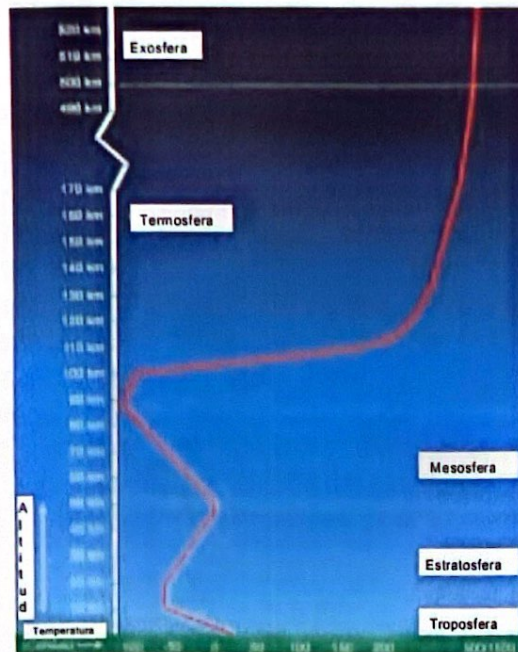


Figura 1. Nomenclatura atmosférica y cambios de temperatura. Cleghorn(2002:Internet).

- **Composición del aire.** Según Chang(1992:167) la composición del aire en volumen es casi 78% de nitrógeno(N_2), 21% de oxígeno(O_2) y 1% de otros gases tales como anhídrido carbónico(CO_2) y argón. Asimismo según Phillips(1995:Internet), el aire está formado por helio, neón, criptón, xenón e hidrógeno. Además de estos gases, en el aire se encuentra vapor de agua, en proporción variable del 1 al 4%, e importantes cantidades de impurezas atmosféricas constituidas por partículas sólidas y líquidas, llamados comúnmente polvillo atmosférico o aerosol.

- **Composición de la atmósfera.** La atmósfera está primordialmente compuesta de nitrógeno(N_2 , 78%), oxígeno(O_2 , 21%) y argón(Ar , 1%). Muchos otros gases están presentes en trazas de concentración (H_2O , 0-7%), gases de efecto invernadero u ozono (O_3 , 0-0.01%) y dióxido de carbono(CO_2 , 0-0.1%).

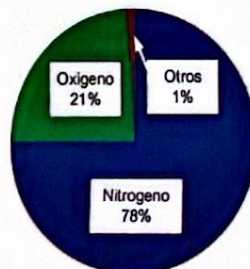


Figura 2. Composición de la atmósfera. Phillips(1995:Internet).

3.2.1 La troposfera. Según Craig(1968:1) el término troposfera se deriva de la palabra en griego *tropain* que significa “dar vuelta” porque la troposfera es una región de convección, con aumento y disminución de las corrientes de aire. De acuerdo a Phillips(1995:Internet) la troposfera se inicia en la superficie de la Tierra y se extiende hasta una altura de 8 a 14.5 kilómetros. Esta es la capa inferior de la atmósfera y es la más densa. A medida que avanzamos hacia arriba en esta capa, la temperatura disminuye de 17 a -52 grados Celsius. Según Craig(1968:5) y Phillips (1995:Internet) la tropopausa separa la troposfera de la siguiente capa(la estratosfera). La tropopausa y la troposfera son denominadas la atmósfera baja.

3.2.2 La estratosfera. Según Craig(1968:4) el término estratosfera se deriva de la palabra en latín *stratum* que significa “capa plana”, esto por la ausencia de convección. De acuerdo con Phillips(1995:Internet) la estratosfera se inicia sobre la troposfera y se extiende hasta una altura de 50 kilómetros. Comparada con la troposfera, esta capa de la atmósfera es seca y poco densa. La temperatura en esta región se incrementa gradualmente hasta -3 grados Celsius, debido a la absorción de radiación ultravioleta. La capa de ozono que absorbe y dispersa la radiación ultravioleta, se encuentra en esta capa de la atmósfera. El 99% del aire esta localizado en la troposfera y estratosfera. La estratopausa separa la estratosfera de la siguiente capa(la mesosfera).

3.2.3 La mesosfera. La mesosfera se inicia sobre la estratosfera y se extiende hasta 85 kilómetros de altura. En esta región, la temperatura nuevamente cae debajo de -93 grados Celsius a medida que se incremente la altitud. Los componentes químicos están en estado excitado, al absorber energía del Sol. La mesopausa separa la estratosfera de la siguiente capa(la termosfera).

Las regiones de la estratosfera y la mesosfera, junto con la estratopausa y mesopausa son llamadas atmósfera media.

3.2.4 La termosfera. La termosfera inicia sobre la mesosfera y se extiende hasta 600 kilómetros de altura. La temperatura se incrementa con la altitud, debido a la energía del Sol. La temperatura en esta región puede llegar tan alta como 1,727 grados Celsius. Las reacciones químicas ocurren más rápido que en la superficie de la Tierra. Esta capa es conocida como atmósfera superior.

3.2.5 Más allá de la atmósfera: La exosfera inicia en lo más alto de la termosfera y continua hasta combinarse con los gases interplanetarios o espacio.

3.3 La contaminación de la estratosfera

Actualmente existe menos ozono en la estratosfera que hace una década de acuerdo con Somerville(1996:13). Esto debido en gran parte a la invención de un científico industrial, Thomas Midgley Jr. nacido en 1889, en Beaver Falls Pennsylvania, Midgley creció en Columbus Ohio, y estudió ingeniería mecánica en la Universidad de Cornell.

Aunque sus grandes logros fueron en química industrial, como químico fue un gran autodidacta. A la edad de 33 años, mientras trabajaba para el Instituto de Investigación de General Motors, descubrió el valor del tetraetilo de plomo como aditivo de la gasolina. Esta sustancia incrementaba el rango de octanaje de la gasolina y entonces los rangos de compresión en los motores de los automóviles serían mayores y con más potencia. Era una invención notable y un fantástico estímulo a la industria automotriz.

Tiempo después la humanidad aprendió que el plomo en la gasolina, en pintura y en otras substancias tiene efecto nocivo al llegar al medio ambiente. El plomo es ahora prohibido en muchas aplicaciones. Actualmente muchos países requieren convertidores catalíticos en los sistemas de escape de automóviles para facilitar las reacciones que destruyen los contaminantes dañinos de dichos gases. Si el plomo llega al convertidor catalítico, el catalizador se convierte en menos eficiente en efectuar las reacciones. Entonces para contribuir a la función del convertidor catalítico, se ha cambiado a gasolina sin plomo.

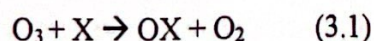
Habiendo tenido éxito Midgley con el tetraetilo de plomo, le fue encomendado desarrollar un refrigerante seguro. Los químicos previamente utilizados en refrigerantes eran dióxido de azufre, amonio y cloruro de metilo, los cuales eran tóxicos o inflamables. En 1928, Midgley inventó una clase de químicos llamado clorofluorocarbonos.

Clorofluorocarbonos o CFC's son químicos que fueron considerados milagrosos. No son tóxicos, ni tampoco corrosivos, químicamente son casi inertes y tienden a no reaccionar con otro compuesto. Son magníficos refrigerantes y pueden tener también otros usos industriales. Son solventes para limpiar partes en la industria electrónica y existen como fluido de enfriamiento en la mayoría de sistemas de aire acondicionado de automóviles. Millones de toneladas de CFC's han sido producidas por Du Pont y otras compañías. Comercialmente los CFC's tuvieron gran éxito. Después se descubrió que destruyen al ozono y por esta razón han sido prohibidos por acuerdos internacionales.

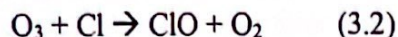
La industria de los CFC floreció por décadas. Después de 30 años de la muerte de Midgley, los CFC's fueron implicados en la destrucción del ozono. Dos químicos en la Universidad de California, Irvine analizaron el ozono estratosférico y su sensibilidad a otros químicos que pueden encontrarse en la estratosfera. Mario Molina y Sherwood Rowland, en una publicación de 1974, teorizaron la existencia y la naturaleza de una molécula especial, llamada catalizador, que puede ser importante en la química de la destrucción del ozono.

Un catalizador es una sustancia que estimula una reacción química, si es habilitada o acelerada, sin cambiar sus propiedades. En la teoría Rowland y Molina, la molécula de ozono se combina con otra molécula, el catalizador, en tal caso el ozono se separa en dos entidades, en una molécula ordinaria de oxígeno y un átomo de oxígeno (el tercer átomo de la molécula de ozono), el cual se combina con el catalizador.

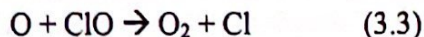
De acuerdo a Somerville(1996:15) si llamamos el catalizador X, la reacción tiene la siguiente forma:



El cloro (Cl) es efectivo como catalizador en esta reacción:



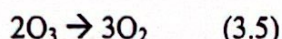
El cloro se combina con el ozono para formar ClO. Seguidamente ClO se combina con un átomo libre de oxígeno. El resultado es una molécula de oxígeno ordinario y un átomo de Cl se encuentra libre nuevamente:



El átomo de oxígeno libre es resultado de la fotodisociación descrita anteriormente:

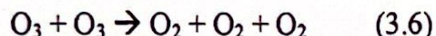


Estas tres reacciones constituyen un ciclo típico. Al sumarlas obtenemos:



Se inició con dos moléculas de ozono y terminó con tres moléculas ordinarias de oxígeno. Se necesitó la molécula de cloro para formar el compuesto intermedio ClO, pero sólo temporalmente, porque la molécula ClO pronto se separó. Por eso el Cl es llamado catalizador, se escapa intacto y sin ningún cambio.

Casualmente, se pueden tomar dos moléculas de ozono O_3 y esperar que se separen tres moléculas de oxígeno O_2 :



Pero esta reacción no ocurre. Las moléculas de ozono son estables, no se separan espontáneamente. Pero en la presencia de una molécula que actúa como catalizador, una de las moléculas de ozono puede disociarse para formar una molécula de oxígeno O_2 . El tercer átomo de oxígeno, luego se combina con el catalizador, temporalmente y la molécula forma una combinación efectiva con otra molécula de ozono para producir dos moléculas de oxígeno, sin alterar el catalizador (destruyendo el ozono).

Según Somerville(1996:16) ciertas moléculas trabajan especialmente como catalizadores. Para la reacción anterior es el cloro. Un átomo de cloro puede estar en este ciclo cientos de veces antes de combinarse finalmente de forma permanente. Un átomo de cloro encuentra una molécula de ozono, se separa temporalmente y forma una molécula de monóxido de cloro, luego se rompe la molécula en la presencia de otra molécula de ozono para formar dos o más moléculas y dejar libre el átomo de cloro.

El cloro se puede combinar con otros elementos, pero su mayor poder de reacción es debido a que el cloro puede repetir este ciclo. Entonces al adicionar cloro a la estratosfera se puede crear el potencial para destruir una gran cantidad de ozono rápidamente. Un átomo de cloro puede realizar este ciclo entre 1000 y 10000 veces antes de combinarse de forma permanente.

Según Somerbille(1996:17) aunque las moléculas de CFC son igual de raras que el ozono, ahora existen millones de toneladas de ellas en la atmósfera. Su concentración es medida en partes por billón y no en partes por millón como es el caso del ozono.

Los principales clorofluorocarbonos son: CFC-11, el CFC-12 y el CFC-13. El CFC-11 es usado como refrigerante pero también bastante tiempo utilizado como propulsor en latas de spray aerosol. En Estados Unidos las latas de spray aerosol, conteniendo Freón empezaron a utilizarse a finales de 1970. El CFC-11 era el Freón en esas latas de spray (Freón es un nombre industrial usado por Du Pont, o bien clorofluorocarbono once). Otro clorofluorocarbono, es el CFC-12 que fue usado en aerosoles, refrigerantes y aires acondicionados. Asimismo, de acuerdo a Somerbille(1996:18), también fue usado el CFC-13 el cual es un solvente, utilizado especialmente en la industria de electrónicos en la aplicación de circuitos impresos. En 1980 estos CFC's fueron producidos a razón de varios miles de toneladas al año.

3.3.1 El ozono (O_3) atmosférico. De acuerdo con Somerbille(1996:6) el ozono es una forma de oxígeno que se identifica con el símbolo químico de O_3 , y tiene tres átomos de oxígeno. El ozono se encuentra en su mayoría en la troposfera; es una pequeña proporción comparado con las enormes cantidades de oxígeno en la atmósfera. El ozono es útil o dañino para los humanos, dependiendo de su ubicación en la atmósfera. Es críticamente importante(ozono estratosférico) por su habilidad de proteger a los humanos y otras formas de vida de la radiación ultravioleta(componente de la luz solar que es dañina). Pero según Craig(1968:7) irónicamente el ozono es venenoso y corrosivo para algunos materiales como el caucho.

Según Somerbille(1996:7) ordinariamente el oxígeno, es un gas que es común en la atmósfera (O_2) con dos átomos de oxígeno por molécula. El oxígeno en forma de O_2 es un millón de veces más abundante que el ozono. Es el segundo gas más abundante en la atmósfera. La mayor parte de la atmósfera consiste en nitrógeno, casi todo el resto es oxígeno. Los dos gases juntos constituyen el 99% de la atmósfera seca¹.

La concentración de ozono, la cantidad de ozono por unidad de volumen, varía con la latitud o distancia del Ecuador. El ozono en los trópicos, cerca del Ecuador, es mucho menos concentrado que a latitudes medias entre el Ecuador y los polos. El ozono también varía con las estaciones del año. Absorbiendo la radiación ultravioleta del sol y usando la energía de esta radiación para producir reacciones químicas, el ozono también afecta la temperatura de la estratosfera y se le atribuye en su mayoría el aumento de la temperatura con respecto a la altitud.

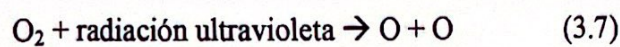
El ozono se encuentra en la atmósfera, porque ciertos tipos de luz solar son capaces de romper los enlaces en las moléculas de oxígeno ordinario y dejarlo libre. Estos átomos libres de oxígeno(O) algunas veces puede combinarse con moléculas de oxígeno ordinarias (O_2) para formar ozono (O_3). Existe un mecanismo de reacción que ocurre todo el tiempo en la estratosfera donde el ozono es constantemente formado y destruido. En la ausencia de otras reacciones existe equilibrio y la concentración promedio no varía mucho.

¹ La atmósfera seca es aquella que no posee agua, porque la concentración de vapor de agua es variable con la altura.

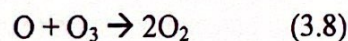
El ozono es producido y destruido a todas altitudes, pero su concentración varía porque se mueve con el viento, y también por los procesos químicos que los producen y los destruyen. La máxima concentración de ozono se encuentra dentro de la región que llamamos capa de ozono, aunque sólo existan concentraciones de pocas partes por millón.

De acuerdo a Somerbille(1996:8) y a Craig(1968:62), un átomo de oxígeno O, tiende a combinarse con otras moléculas. Por eso los átomos de oxígeno no se mantienen solos por largo tiempo. Por lo contrario, la molécula de oxígeno de cada día O₂, no es muy reactiva y es más abundante.

El ozono ocurre porque el oxígeno ordinario (O₂) es sensible a la luz solar, y en ocasiones se rompe y separa por la absorción de la radiación solar, este proceso se conoce como fotodisociación. De acuerdo a Somerbille(1996:9) la reacción química donde la molécula ordinaria de oxígeno O₂, en la presencia de luz solar ultravioleta se rompe en dos átomos libres, ocurre en la alta atmósfera:



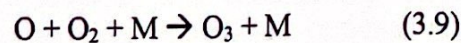
La reacción muestra un balance. Los átomos de oxígeno no son creados ni destruidos, simplemente reorganizados. La mayoría de los átomos de oxígeno, que resultan de la reacción de fotodisociación, pronto se recombinan con ozono para formar nuevas moléculas de oxígeno. La reacción dominante es:



El significado de esta reacción es que un átomo libre de oxígeno se combina con una molécula de ozono para producir dos moléculas de oxígeno. Nuevamente existe un balance.

Casi todo átomo de oxígeno de toda molécula del mismo se separa y recombina. Por eso se establece un equilibrio entre separación de moléculas de oxígeno en átomos y recombinación de estos átomos a moléculas de oxígeno.

De lo anterior, un átomo de oxígeno libre producto de fotodisociación, puede combinarse con una molécula de oxígeno para formar ozono O₃. Por lo que tenemos la siguiente ecuación:

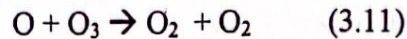


Donde la M es otra molécula. M es la molécula mediadora o tercer cuerpo. La presencia de la molécula M es especialmente requerida para que la formación de ozono se produzca.

Según Somerbille(1996:10) el ozono puede destruirse por la misma radiación ultravioleta que causa que la molécula de oxígeno se rompa y separe. Esto puede foto disociar la molécula de ozono, rompiéndola y separándola en sus componentes, oxígeno ordinario y un átomo de oxígeno:



De forma alterna la molécula de ozono puede combinarse con el átomo de oxígeno para formar dos moléculas de oxígeno.



En general se puede imaginar que la atmósfera alcanza el equilibrio, pues hay una situación en la cual las cantidades de ozono y oxígeno no cambian. Sin embargo, si hay mucho más oxígeno ordinario que ozono, en la estratosfera, la fotodisociación, produce cerca de una giga-tonelada (billón de toneladas) de ozono por año. Así que aunque el ozono es un constituyente raro en la atmósfera, permanece en gran cantidad.

En la atmósfera, el ozono está casi todo en la estratosfera. Existen alrededor de tres giga-toneladas en la atmósfera actualmente. Cerca de una giga-tonelada es creada al año y alrededor de una giga-tonelada es destruida en un año, a través del proceso que se discutió anteriormente. Pero como se puede observar, la cantidad de ozono que se encuentra allí se puede cambiar ya sea produciendo más o encontrando formas de destruirlo más rápido de lo que es producido.

De acuerdo a Somerville(1996:11) existe ozono bueno y malo. Diferenciándose únicamente por su localización en la atmósfera. El ozono en la estratosfera es bueno porque nos protege de los rayos ultravioleta, en parte porque absorbe esta radiación ultravioleta. Y existe el ozono malo, que se encuentra en la parte baja de la atmósfera donde respiramos. Este también absorbe radiación ultravioleta, pero también daña las plantas, nuestros ojos, ataca varios materiales, y es venenoso al inhalarlo excesivamente. Por eso es preocupante el ozono en la atmósfera baja, particularmente como constituyente del smog.

3.3.2 Cuantificación del ozono estratosférico. Para la medición del ozono estratosférico se utiliza la unidad llamada Dobson. Nombrada así en honor a Gordon Dobson, un físico de Oxford, quien fue el pionero en estudios del ozono atmosférico. En 1926 Dobson diseñó un instrumento simple para medir cantidades de ozono estratosférico desde la tierra y fue el primero en crear una red global de monitoreo de ozono. El instrumento es llamado espectrofotómetro, el cual funciona midiendo radiación solar en diferentes longitudes de onda. Se basa en los conocimientos de las propiedades de los gases de absorción de radiación.

Según Somerville(1996:12) sí se encuentran 2.69×10^{16} moléculas de ozono en una columna de la atmósfera sobre un particular centímetro cuadrado de la superficie de la Tierra, entonces la abundancia del ozono en esa columna es de una unidad Dobson, o 1 DU. Pero la típica concentración en la atmósfera es mucho mayor que 1 DU.

En realidad una columna promedio de atmósfera sobre 1 un centímetro cuadrado de la superficie contiene varios cientos más que 2.69×10^{16} moléculas de ozono. De esta manera la concentración de ozono en la atmósfera de la Tierra es de varios cientos de DU. En general el ozono es más abundante a latitudes altas (cerca de los polos) y menos abundante en los trópicos(cerca del Ecuador).

La medición de la abundancia de moléculas de ozono se realiza por medio de una columna imaginaria, expresada en DU. Un valor típico promedio de la abundancia

de ozono es alrededor de 250 DU cerca del Ecuador, incrementándose hasta 300 DU a latitudes medias. Valores cercanos a 400 DU pueden ocurrir cerca de los polos. El dato del total de moléculas de ozono en el planeta Tierra es cerca de 4×10^{37} .

Sin embargo, el ozono es raro. La cantidad de moléculas en el aire es de 99% nitrógeno y oxígeno ordinario con lo que se tiene 10^{44} moléculas. Lo que significa tener más de un millón de moléculas de aire (nitrógeno, oxígeno, etc) por cada molécula de ozono. Es decir la concentración del ozono en la atmósfera es menor de una parte por millón. Si la concentración de ozono en la Antártica decae de 300 unidades Dobson hasta 150 unidades Dobson, entonces la mitad desapareció.

3.3.3 Tipos de radiación ultravioleta. La energía del Sol que alcanza la Tierra llega como rayos en el espectro como visibles, infrarrojos y ultravioletas. La radiación ultravioleta está dividida en tres tipos, de acuerdo a su longitud de onda:

Ultravioleta A (UV-A) emitida entre las longitudes de onda de 320-400nm.

Ultravioleta B (UV-B) emitida entre las longitudes de onda de 280-320nm.

Ultravioleta C (UV-C) emitida entre las longitudes de onda de 100-280nm.

Únicamente los rayos con longitudes de onda de UV-A y UV-B alcanzan la superficie terrestre. La atmósfera de la Tierra absorbe la UV-C.

La UV-B causa más riesgo de adquirir cáncer que la UV-A, aunque los rayos de UV-A causan envejecimiento, arrugas y pérdida de elasticidad en los materiales.

La UV-A incrementa los daños causados por la UV-B, llegando hasta el cáncer de piel y cataratas (distorsión caracterizada por el cambio en la estructura del lente cristalino que causa que se nuble la visión).

El 90% del ozono en nuestra atmósfera se encuentra en la estratosfera (la región de 10 a 50km de altitud). Y protege de la radiación UV-B. El 10% de ozono restante está contenido en la troposfera (la región de 0 a 10km de altitud).

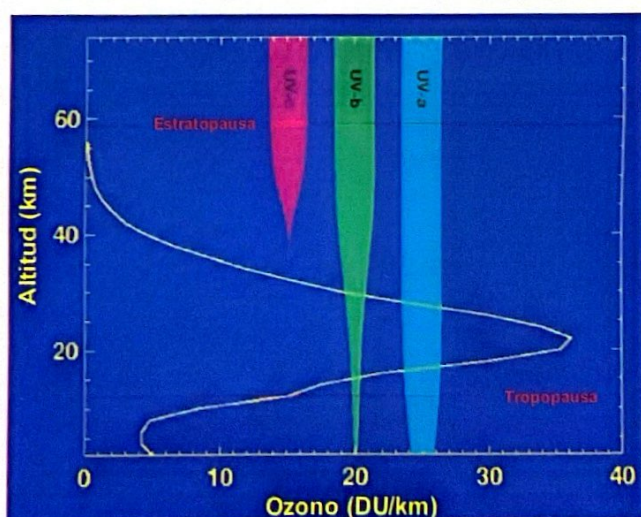


Figura 3. Perfil vertical del ozono en la atmósfera. Stanford(2002:Internet).

3.4. El láser

El término láser de acuerdo a Espasa(2002:1005) proviene del inglés Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation (amplificación de la luz por emisión estimulada de radiación). Es un dispositivo electrónico que amplifica un haz de luz monocromática y coherente de extraordinaria intensidad. Se basa en la excitación de una onda estacionaria entre dos espejos, uno opaco y otro traslucido, en un medio homogéneo. Suministrando la energía desde el exterior, los electrones luminosos del medio se elevan a determinado nivel energético; por emisión inducida, un cuanto de radiación de determinada frecuencia excita los electrones y pasan al estado fundamental. Así se origina una onda luminosa de múltiples idas y venidas entre los espejos, que finalmente sale por el traslucido.

Según O'shea(1978:1) el Láser se está acercando al final de su quinta década de invención. Durante este periodo se ha convertido de "una invención en búsqueda de aplicación" a uno de los aportes más importantes en la tecnología del siglo XX. Esto trajo un renacimiento de la ciencia y la tecnología en el campo de la óptica y ha dirigido el desarrollo de nuevas industrias.

El gran impacto del láser en la industria y en la investigación es consecuencia de las propiedades extraordinarias de la luz del láser comparado con las de luz de cualquier otra fuente, natural o artificial.

3.4.1 Tipos de láser. De acuerdo a Arieli(2002:Internet) la clasificación de los distintos tipos de láser según el estado físico del medio activo es:

- Láser de gas
- Láser líquidos
- Láser sólidos
- Láser especiales

3.4.1.1 Láser de gas. Según Measures(1984:185) los láser de gas son los más versátiles. Dentro de esta clasificación están los láser con la menor y mayor longitud de onda con frecuencia de salida desde la ultravioleta a la infrarroja, los de mayor eficiencia y los de mayor potencia. Los gases pueden ser bombeados por una gran variedad de técnicas incluyendo las que usan descargas eléctricas, rayos de electrón, combinación de flujos químicos, expansiones termodinámicas de gas y fragmentación de fisión nuclear.

Dentro de los tipos de láser de gas se tienen los siguientes de acuerdo a Arieli(2002:Internet):

- Láser de átomo:
 - Helio-Neón (He-Ne)
 - Helio-Cadmio(He-Cd)
- Láser de vapor de metal:
 - Vapor de cobre (Cu)
 - Vapor de oro(Ag)

- Láser de molécula:
 - Dióxido de carbono (CO₂)
 - Nitrógeno (N₂)
 - Químico (HF-DF)
 - FIR (Far Infrared, infrarrojo lejano)
 - Excimer
- Láser de ión:
 - Ion de argón (Ar⁺)
 - Ion de criptón (Kr⁺)

- **Láser de átomo:**

➤ **Láser Helio-Neón (He-Ne).** El Helio-Neón fue el láser más común hasta que apareció el láser de diodo en los últimos años. El primero fue construido en 1961 por Ali Javan. Según O'Shea(1978:126) este láser utiliza la transición entre niveles de energía de átomos no ionizados. El medio activo es una mezcla de diez partes de helio y una parte de neón. Solamente los niveles de energía del átomo de neón están directamente envueltos en la transición láser, el gas de helio esta presente para proveer un mecanismo eficiente de excitación para los átomos de neón.

Dos niveles de energía meta-estable actúan como los niveles superiores del láser. El láser He-Ne tiene dos niveles bajos, sólo pocas longitudes de onda pueden salir de estos niveles de transición. Generalmente este tipo de láser se encuentra entre niveles de potencia de salida de 0.5 a 8.5mW. El diagrama del nivel de energía del láser Helio-Neón está descrito en la figura 4.

Las longitudes de onda importantes son:

$$\lambda_1=0.6328\mu\text{m} \text{ (632.8nm)}, \lambda_2=1.152\mu\text{m}, \lambda_3=3.3913\mu\text{m}$$

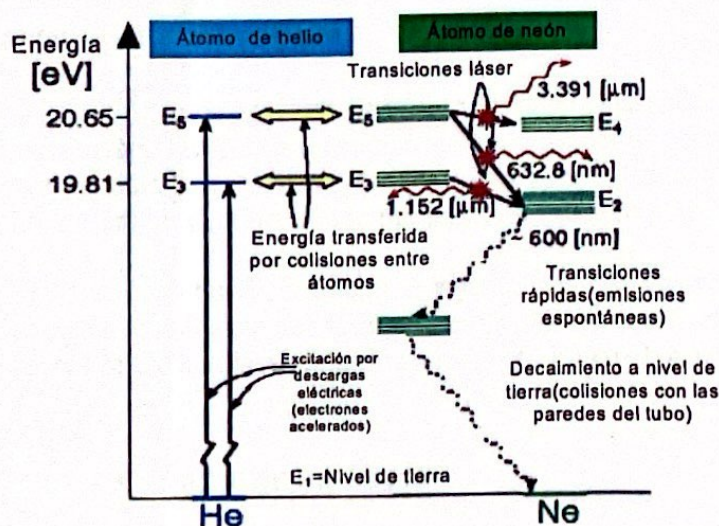


Figura 4. Diagrama de niveles de energía del láser He-Ne. Arieli(2002:Internet).

➤ **Láser Helio-Cadmio (He-Cd).** De acuerdo a O'Shea (1978:135) en los láser de vapor de metal, los átomos metálicos son calentados para formar un vapor en el tubo de descarga, el cual contiene algo de gas de helio.

En el láser de helio-cadmio son creados átomos de helio meta estables excitados en la descarga, al chocar con los átomos de cadmio y una transferencia de energía ocurre. En la transferencia, el átomo de cadmio es ionizado y el átomo de helio regresa a su estado de tierra; tal proceso es llamado ionización *Penning*. Los iones de cadmio se dejan en un estado excitado de donde las transiciones del láser ocurren. La inversión de población se mantiene, porque los iones decaen más rápido de los niveles más bajos que de los más altos y la neutralización del ión de cadmio ocurre en las paredes del tubo.

Según O'shea(1978:137) la mayoría de láser de He-Cd tienen potencias de salida de 5 a 15mW con longitudes de onda de $\lambda=442\text{nm}$ (azul) y a $\lambda=325\text{nm}$ (ultravioleta). Diferentes juegos de espejos se requieren para operar a estas dos longitudes de onda. Si los tubos tienen espejos internos la salida es restringida a una o dos longitudes de onda.

• **Láser de vapor de metal**

➤ **Láser de vapor de cobre.** Los primeros láser según Arieli(2002:Internet) de este tipo aparecieron alrededor de 1980. Este láser era atractivo debido a su relativamente alta eficiencia (superior al 1%) para los láser en la banda de espectro visible y la alta energía del pulso alcanzado.

El láser de vapor de cobre, esta constituido por un láser del gas, construido cono un tubo con ventanas en ambos extremos. El tubo se llena de un gas inerte y de una cantidad pequeña de cobre puro. Para tener vapor de cobre, el metal necesita estar en temperaturas muy altas. El tubo posee estructura de alúmina o de Zirkonia, que son materiales resistentes a la alta temperatura. El diámetro del tubo es 10-80milímetros, y contiene el gas de neón en una presión de 25-50Torr. Generalmente este tipo de láser se encuentra entre niveles de potencia de salida de 1 a 50mW.

➤ **Láser de vapor de oro.** El láser de vapor de oro es muy similar en estructura y teoría de operación al láser de vapor de cobre. En ocasiones el mismo sistema (tubo del láser y fuente de alimentación) se utiliza para ambos láser. El único cambio es sustituir el cobre sólido por un alambre de oro puro.

La longitud de onda del láser de oro es roja: 630nm con una potencia de salida de 15mW. Los usos principales del láser de vapor de oro están en el tratamiento experimental del cáncer de la terapia foto-dinámica (PDT Photo-Dynamic Therapy).

• **Láser de molécula**

➤ **Láser de dióxido de carbono.** De acuerdo a O'Shea(1978:137) el láser de CO_2 es el más utilizado en la industria. Los láser de CO_2 ofrecen alta potencia (~1MW) y alta eficiencia en longitudes de onda del infrarrojo.

Láser de dióxido de carbono se utilizan para soldar metales, cortar cerámica y ejecutar otras tareas del procesamiento de materiales. El láser de CO_2 es el más importante de los láser conocidos del tipo molecular. Las moléculas tienen una estructura complicada y sus niveles de energía corresponden a movimientos de rotación o vibración de la estructura molecular.

Según Arieli(2002:Internet) el láser estándar de CO_2 incluye en el medio activo una mezcla del CO_2 con N_2 y He. La proporción óptima de estos 3 gases en la mezcla depende del sistema del láser y del mecanismo de excitación. En general, para un láser de onda continua las proporciones son 1:1:8 es decir, que por cada molécula de dióxido de carbono (CO_2), se agrega una de nitrógeno (N_2) y ocho de helio (He) para mejorar el desempeño de salida del láser.

El CO_2 es una molécula lineal, y los tres átomos se sitúan en una línea recta con el átomo de carbón en el centro. En la figura 5 se ilustran los tres modos vibratorios de la molécula de CO_2 :

1. Modo simétrico del estiramiento (ν_1).
2. Modo de flexión (ν_2).
3. Modo asimétrico del estiramiento (ν_3).

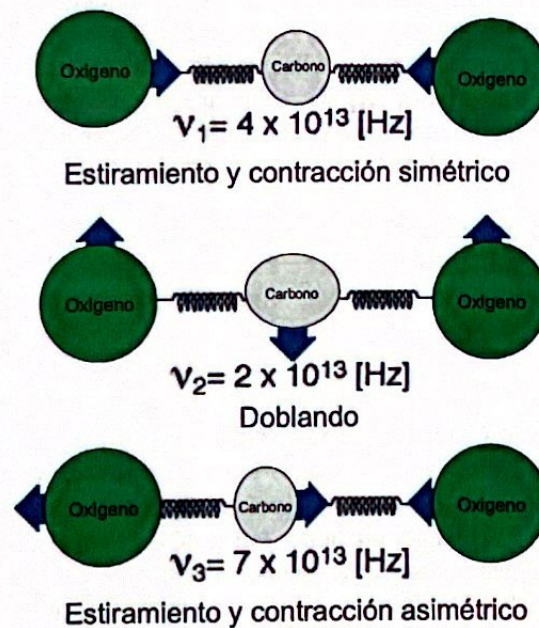


Figura 5. Modos de oscilación de la molécula de CO_2 . Arieli(2002:Internet).

➤ **Láser de nitrógeno.** El láser del nitrógeno fue desarrollado en 1963 y se ha vendido como producto comercial desde 1972. El medio activo en los láser del nitrógeno es gas de nitrógeno en las presiones de 20Torr hasta 1Atm. En algunos láser de nitrógeno el gas fluye en el tubo, mientras que otros tienen un tubo sellado. Como la mayoría de los láser de gas, el láser de nitrógeno se basa en transiciones entre los niveles de vibración de energía y se excita eléctricamente. El diagrama del nivel de energía del láser de nitrógeno se muestra en la siguiente figura.

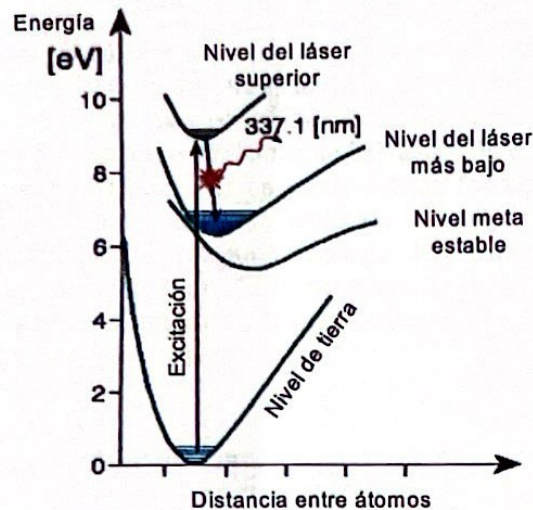


Figura 6. Diagrama del nivel de energía del láser de nitrógeno. Arieli(2002:Internet).

➤ **El láser químico.** El láser de producto químico, es un ejemplo de un láser donde la energía de la bomba viene de una reacción química entre dos átomos. Es un miembro de la familia de los láser de gas dinámico. Se basan en la extensión rápida del gas caliente y alta presión, a través de inyectores en un valor cercano al vacío. Esta extensión rápida reduce la temperatura del gas. Se obtienen muchas moléculas en los niveles excitados. El gas usualmente fluye a través de los inyectores en un flujo transversal (perpendicular al eje óptico del láser), así que muchos inyectores pueden funcionar al mismo tiempo, permitiendo alta energía desde el láser.

El primer láser de producto químico, que funcionó en el modo pulsado, fue desarrollado por J. V. V. Kasper, y G. C. Pimental en 1965. La acción *lasing* del láser de producto químico se basa generalmente en transiciones vibratorias de la molécula diatómica.

➤ **Los láser del infrarrojo lejano.** Los láser del infrarrojo lejano emiten la radiación en el espectro Lejos-Infra-Rojo (gama de longitud de onda entre 12-1000 μm). La gama de longitud de onda mayor de 100 μm a veces se llama onda de sub-milimetro. Los láser del infrarrojo lejano (FIR) son láser de gas, y su acción *lasing* ocurre entre los niveles rotatorios de las moléculas del gas del medio activo. Usualmente estas transiciones ocurren generalmente dentro del mismo nivel vibratorio. El medio activo en láser FIR es generalmente un gas de una molécula orgánica simple por ejemplo: C_2H_4 (etileno), CF_4 (tetrafluoruro de carbono), NH_3 (amonio).

Debido a que la separación entre los niveles de energía es muy estrecha en estos materiales, es ineficiente bombearlos de forma óptica con fuentes de luz ordinaria. La mejor manera de alcanzar la inversión de la población en estos láser es bombearlos con otro láser en una longitud de onda más corta por lo general el que se utiliza es el láser de CO_2 .

➤ **El láser de excimer.** Existen láser en los cuales las condiciones requeridas para *lasing* se alcanzan de maneras no comunes. Un ejemplo de ello es una familia de los láser en los cuales la radiación se emite de una molécula que exista solamente por un tiempo muy corto. Esta molécula se compone de un átomo de gas noble: argón, criptón o xenón, y un átomo de halógeno: flúor, cloro, bromo o yodo. Un excimer es una molécula que tiene un estado latente (existente) solamente en un estado excitado. En el estado base esta molécula no existe, y los átomos están separados. El estado excitado existe por un tiempo muy corto, menos de 10 nanosegundos. El excimer conocido viene de la combinación de las dos palabras: *excited dimer*, que significa que la molécula está compuesta de dos átomos, y existe solamente en un estado excitado.

- **Láser de ión**

➤ **Láser de gas de ión de argón (Ar^+).** El láser de gas de ión del argón (Ar^+) fue inventado en 1964 por Guillermo Bridges en Hughes (Aircraft Company). El láser de ión de argón contiene un tubo lleno de gas de argón que se transforma en plasma² en un estado excitado. Un diagrama esquemático de los niveles de energía del láser de argón se demuestra en la siguiente figura.

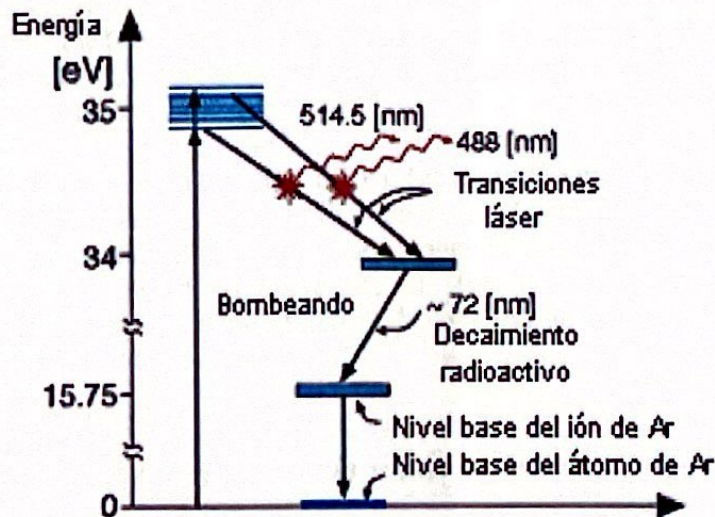


Figura 7. Diagrama de los niveles de energía del láser del ión de argón. Arieli(2002:Internet).

Las dos principales transiciones de láser a longitudes de onda visible son:

Azul 0.488 μ m
Verde 0.5145 μ m,

Pero, el láser de ión de argón emite también en el espectro UV (ultra violeta):

0.3511 μ m
0.3638 μ m.

²El plasma es el estado de la materia en que los electrones se separan de los átomos y de las moléculas, lo que significa que contiene electrones e iones libres.

➤ **Láser de criptón.** El láser de criptón es muy similar al láser del argón, pero su eficacia es más baja. Este láser tiene muchas líneas en el espectro visible, especialmente en el amarillo a la parte roja del espectro. La energía máxima de la salida en cada línea es cerca de 100mW. Los usos principales de este láser están en el arte, en los hospitales y para crear efectos visuales fantásticos.

3.4.1.2. Láser líquido

➤ **Láser de dye.** De acuerdo a Measures(1984:191), la clase de moléculas orgánicas que absorben fuertemente y son intensamente fluorescentes son llamados de dye.

Según O'Shea(1978:168) la ventaja más importante del láser de dye sobre los otros láser es que puede ser sintonizado sobre una amplia gama de frecuencias. Comparado con los láser de gas y de estado sólido que sólo pueden sintonizarse en una pequeña gama. Aunque los láser disponibles de gas y estado sólido cubren un número discreto de longitudes de onda en el espectro del ultravioleta al infrarrojo.

Según Arieli(2002:Internet) el láser de dye se puede considerar como dispositivo especial para convertir la radiación electromagnética de una longitud de onda, a otra longitud de onda que pueda ser sintonizada. La salida de un láser de dye es siempre una radiación coherente armoniosa sobre una región específica del espectro y que es determinada por el material del dye.

Históricamente el primer láser de dye fue mostrado en 1965 en los laboratorios de la IBM en los U.S.A., por Peter P. Sorokin y J. R. Lankard. Descubrieron la acción del láser de dye durante una investigación sobre la fluorescencia de las moléculas orgánicas dye, que fueron excitadas por el láser de Rubí. En 1967 científicos descubrieron la posibilidad para sintonizar la longitud de onda emitida, usando una rejilla en el extremo de la cavidad óptica.

3.4.1.3 Láser de estado sólido

- Aislante:
 - Láser de rubí
 - Láser de Nd:YAG y Nd:cristal
 - Láser de centro de color
 - Láser de Alejandrita
 - Láser de titanio-zafiro
- Semiconductor:
 - Láser de diodos

➤ **El láser de rubí.** El láser de rubí es el primer láser que se construyó y fue por Theodore Maiman en 1960. El rubí es un cristal sintético del óxido de aluminio (Al_2O_3) y es familiar en la vida cotidiana como piedra preciosa para joyas. La estructura química del rubí es Al_2O_3 (llamado zafiro), con la impureza de cerca de 0,05% (por el peso) de los iones del cromo (Cr^{+3}). El ión activo es Cr^{+3} , que substituyen el átomo del aluminio en el cristal. Este ión causa el color rojo del cristal. El ión de la impureza de Cr^{+3} es responsable de los niveles de energía que participan en el proceso de *lasing*.

➤ **Láser de Nd:YAG y Nd:cristal.** En este láser, los iones de Nd^{+3} (como impurezas en pequeño porcentaje del peso) están substituyendo los átomos del sólido anfitrión en el medio activo. Tres anfitriones sólidos se utilizan para el láser Nd:YAG donde los iones Nd^{+3} se agregan como impurezas:

- Vidrio.
- Cristal de YAG (Granate de aluminio del itrio, $\text{Y}_3\text{Al}_2\text{O}_{15}$).
- Cristal de YLF (LiYF_4).

La opción de escoger entre los tres anfitriones posibles es según el uso previsto del láser. Por ejemplo el vidrio se utiliza como el material del anfitrión, cuando un láser pulsado en la alta energía y la razón de repetición del pulso necesaria es lenta. El medio activo del láser de Nd:Vidrio se puede fabricar en una forma de disco o de barra, con los diámetros de hasta 0.5 metros y de longitud de hasta de varios metros. Tales dimensiones son posibles porque el vidrio es material, barato e isotrópico y se puede moldear fácilmente. Se puede agregar un alto porcentaje (hasta cerca de 6%) de los iones del Nd.

➤ **Láser de centro de color.** Cuando los cristales de los alcaloides se exponen a la radiación de la alta energía tal como radiografías o electrones, se crean defectos de punto dentro del cristal. Estos agregan más niveles de energía a los átomos en el cristal (similar a los niveles de energía de la impureza en semiconductores). Estos niveles de energía adicionales pueden causar la absorción óptica en las longitudes de onda específicas, así como agregando color a los halides transparentes del álcali. Estos colores le dieron el nombre de láser de centro de color.

Hay pocas clases de defectos en cristales, pero para nuestro propósito explicaremos el defecto simple llamado F-centro (de la palabra alemana "Farbe" para el color). Sin dar los detalles específicos sobre niveles de energía en cristales, es suficiente describir el defecto en el cristal, como la región local con la carga extraordinariamente positiva. Esta región se puede mirar como un núcleo rodeado de electrones (un arreglo semejante al átomo de hidrógeno).

El electrón está limitado a una vacante positiva del halógeno. Los estados excitados de la energía del electrón se juntan fuertemente para enrejar vibraciones. Así, todos los estados electrónicos son de banda ancha, dando por resultado amplias bandas de absorción y de emisión.

➤ **El láser de Alejandrita.** El láser denominado Alejandrita, está formado en el estado sólido en que los iones del cromo (Cr^{+3}), en la cantidad de 0.01-0.4 %, se encajan en el cristal BeAl_2O_4 . Tiene una estructura llena de energía similar a la estructura de energía del láser de rubí.

El láser de Alejandrita funcionó por primera vez como láser de tres niveles en 1973 en una longitud de onda de 680nm. Algunos años más tarde, fue encontrado que en longitudes de onda más largas puede funcionar como láser de cuatro niveles y que puede sintonizarse sobre una gama de longitudes de onda entre: 720-800nm. Fue el primer láser de estado sólido armónico. Un modelo del diagrama del nivel de energía que explican la sintonización se puede considerar en la siguiente figura.

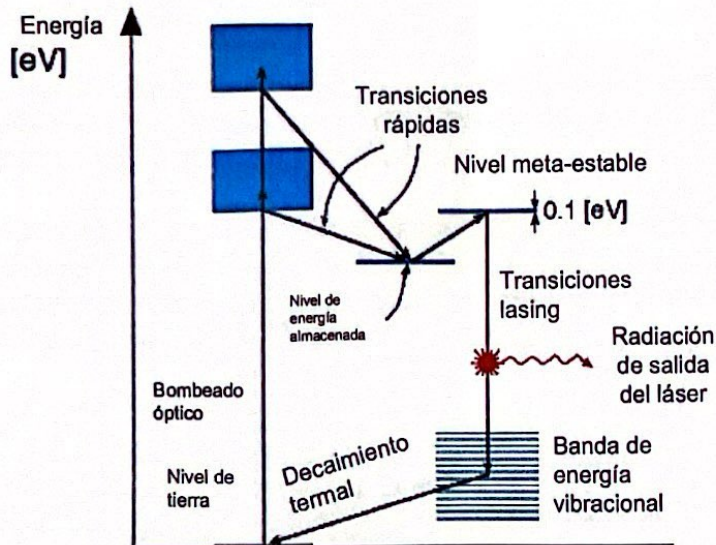


Figura 8. Diagrama de los niveles de energía del láser de Alejandrita. Arieli(2002:Internet)

➤ **Láser de titanio-zafiro.** Al encajar el ión de titanio (Ti^{+3}) en una matriz del zafiro (Al_2O_3). Este material es el medio activo del láser, llamado láser de zafiro dopado de titanio. La cantidad de iones de titanio dentro del material anfitrión es cerca de 0.1%, y substituyen a los átomos de aluminio en el cristal. Los láser de titanio-zafiro pertenecen a una familia de láser llamado *Láser Vibronic*, en el cual el cromo o el titanio trivalente se encaja en el anfitrión sólido. El láser de titanio-zafiro fue demostrado por primera vez en 1982 por Peter Moulton del laboratorio Lincoln de MIT.

Los sistemas comerciales de onda continua se incorporaron al mercado en 1988, sustituyendo a los láser de tinte en el Cercano-Infra-Rojo (NIR), porque son mucho más confiables y más fáciles de utilizar. El titanio es un metal de transición, así los láser de titanio-zafiro pertenecen a los láser de metal de transición. El láser de zafiro dopado de titanio es eficiente, con sintonización confiable en el espectro visible y en el Cercano-Infra-Rojo (NIR).

➤ **El láser de diodo.** Los láser de diodo se construyen de materiales de semiconductores y todos demuestran características eléctricas de diodos. Por esta razón los láser de diodo poseen otros nombres por ejemplo:

-**Láser de semiconductor:** Según el material de que estén compuestos.

-**Láser de juntura:** Puesto que se componen de juntura p-n.

-**Láser de inyección:** Debido a que los electrones son inyectados en el ensamblaje por el voltaje aplicado.

La investigación y el uso comercial de los láser de diodo ha cambiado dramáticamente durante los últimos 20 años. La cantidad de láser de diodo vendidos en un año se mide hoy en millones, mientras que el resto de las clases de láser juntas se miden en decenas de millar.

Es un hecho, que la familia de los láser de diodo se utiliza en una amplia variedad de productos de consumo incluyendo: Discos compactos, impresoras, lectores de código de barras y en comunicación óptica.

Históricamente, el láser de diodo fue inventado independientemente en 1962, en tres diversos laboratorios de investigación en los U.S.A. Los investigadores tuvieron éxito en conseguir una radiación electromagnética coherente de un diodo polarizado hacia adelante (juntura p-n) hecho del semiconductor GaAs.

3.4.1.4 Láser especiales.

- Láser de rayos X
- Láser de electrón libre (Free Electron Laser, FEL)

○ **Láser de rayos X.** Basado en la naturaleza física de las ondas electromagnéticas las cuales no dependen de su longitud de onda, es lógico pensar que es posible crear el láser en cualquier longitud de onda. Pero en la práctica, existe el problema de crear un láser que funciona en la longitud de onda corta de rayos X y γ .

Esto se debe a que el proceso *lasing* depende de las características del medio en que ocurre. Los requisitos del medio activo dependen de las longitudes de onda que necesitaron para ser creadas:

En el espectro visible y en el infrarrojo cercano (NIR), la radiación se emite como resultado de transiciones electrónicas entre los electrones de niveles de energía externos de átomos o de moléculas.

Para crear la radiación (fotones) en el espectro de los rayos X, es necesaria una energía mucho más alta. Tal energía puede venir de transiciones de los niveles de energía externos en niveles de energía internos. Excitar estos niveles de energía requiere mucho más energía para bombear y el tiempo de vida de los estados excitados es muy corto (de la orden de pico-segundos).

Esto implica que, para crear un láser en la región del espectro de los rayos X, se requiere una cantidad grande de energía para la bomba, en un lapso pequeño de tiempo.

○ **Láser de electrón libre.** Los láser de gas o de estado sólido, emiten radiación electromagnética en longitudes de onda específicas, lo que corresponde a transiciones específicas entre niveles de energía del medio activo del láser.

El láser de electrón libre es un dispositivo que puede emitir la radiación electromagnética de alta energía en cualquier longitud de onda. La longitud de onda emitida depende del diseño del láser y no de las características del medio activo. La eficacia de los láser de electrón libre puede ser muy alta (superior al 65%).

3.5 Principios de detección de luz y enfoque con láser (LIDAR)

Según Hinkley (1976:73) el principio básico del radar de sondeo remoto atmosférico por medio de láser se llama LIDAR (Light Detection And Ranging, enfoque y detección de la luz). Este término, es análogo al RADAR (donde el medio activo es el radio), fue el primero en aplicar la técnica de luz pulsada usando una fuente convencional por Middleton y Spilhaus. En la forma más simple, el LIDAR emplea un láser simplemente como fuente de energía pulsada con magnitud útil y duración convenientemente corta.

Típicamente el Q-switched³ del rubí (longitud de onda $\lambda=0.69\mu\text{m}$) o neodimio ($\lambda=1.06\mu\text{m}$) para sistemas del láser se utiliza y se generan los pulsos que tienen potencia máxima medidos en decenas de megavatios y duraciones de 10-20 nanosegundos. En pulsos con tal energía (i.e., de la orden que 1 Joule), los rayos son dirigidos por sistemas ópticos apropiados, un ejemplo se muestra esquemáticamente en Fig.9. La energía del láser es virtualmente monocromática, es altamente coherente y tales rayos se enfocan con alta resolución.

A medida que la energía transmitida del láser pasa a través de la atmósfera, se encuentra con las moléculas de gas y las partículas o las gotitas que causan dispersión. Una fracción pequeña de esta energía es dispersada hacia atrás en la dirección del sistema LIDAR para su detección. La dispersión de la energía, o la dirección de la propagación, o el avance de la absorción por los gases y las partículas, reduce la intensidad del rayo.

Según Hinkley (1976:74) tal atenuación aplica en ambas la trayectoria y desde una región distante de la dispersión de retroceso. En el LIDAR, energía de dispersión de retroceso se recoge en un receptor conveniente por medio de óptica reflexiva o refractiva (véase, Fig.9) y se transfiere al foto detector (comúnmente un fotomultiplicador). Esto produce una señal eléctrica, la intensidad de la cual en el instante es proporcional a la potencia óptica del receptor.

³El "Q" significa calidad. "Switched" es un término técnico que se refiere al factor de intercambio de calidad o selectividad de la estructura resonante óptica del láser.

Puesto que la luz viaja a velocidad conocida, la cantidad del volumen de la dispersión producido por la señal recibida a cualquier instante, se puede determinar únicamente el intervalo del tiempo desde la transmisión del pulso. La magnitud de la señal recibida es determinada por las características de la dispersión de retroceso de la atmósfera en las distancias (alcances) sucesivos, y también por la atenuación atmosférica de dos vías. La dispersión de retroceso atmosférica alternadamente depende de la longitud de onda de la energía del láser usada y del número, del tamaño, de la forma y de las características refractivas de las partículas de las moléculas de gotas interceptadas por la energía incidente.

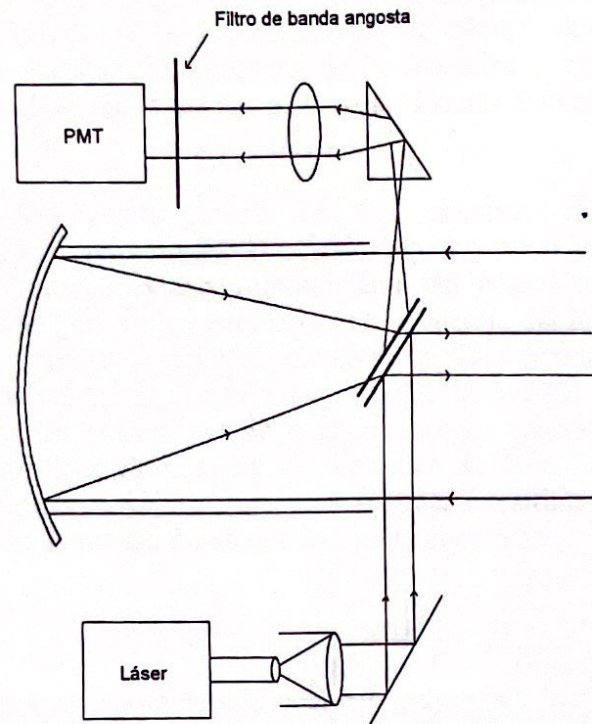


Figura 9. Diagrama esquemático de la configuración fundamental del LIDAR, con geometría coaxial de transmisor/receptor. Hinkley(1976:74).

La señal eléctrica del foto detector contiene así la información sobre la presencia, la distancia (alcance) y la concentración de dispersores y amortiguadores atmosféricos. Hay varias formas de presentar y de analizar tales señales, la forma más simple pueden ser presentadas en un osciloscopio en un sistema de coordenadas mostrando la intensidad de la señal recibida como función de la distancia. Puesto que tales señales son muy transitorias (1 kilómetro de distancia es representado por un intervalo de $7 \mu\text{s}$), es necesario fotografiar lo que el osciloscopio despliega para obtener la presentación adecuada de los datos.

Un ejemplo de una señal registrada de este modo se muestra en la Fig.10. Alternativamente las señales eléctricas se pueden grabar en cinta magnética, disco, o dispositivos de almacenamiento digital para la presentación posterior o procesamiento a bajas velocidades. Las secuencias de observaciones en una dirección dada, o en varios patrones de la exploración, se pueden utilizar para proporcionar la información en las condiciones atmosféricas en una escala extendida espacio o tiempo.

De acuerdo a Hinkley(1976:75) por ejemplo la figura 11, muestra una sección transversal vertical de la intensidad-modulada generada de hacer una serie de observaciones mientras se explora en el plano vertical. La razón en la cual tal información puede ser recolectada depende del índice de repetición de pulso del sistema del láser.

Según Hinkley(1976:76) en muchos casos la intensidad de la señal LIDAR como es exhibido se puede interpretar fácilmente en términos de condiciones atmosféricas en virtud de variaciones relativas. La presencia de niebla y capas de nubes, según lo mostrado en la Fig.11 es un ejemplo típico. Debe observarse, sin embargo, que en evaluaciones cualitativas y en cuantitativas el factor limitador a la señal detectable(dando la sensibilidad adecuada de la detección y de los dispositivos de exhibición) es el nivel del ruido debido a las varias fuentes extrañas de la energía de la señal.

Estos incluyen ruido termal de los circuitos eléctricos implicados, (probablemente lo más importante son el posible disparo y ruido del foto detector) y del ruido causados por energía óptica, (normalmente del origen solar, presente luz de fondo). Debido al alto grado monocromático de la energía del láser, la luz extraña se puede excluir a un grado substancial por el uso de un filtro de banda estrecha centrado en la frecuencia del láser. Incidentemente, porque la energía del láser puede ser enfocada altamente, es posible dirigir toda la energía transmitida en un estrecho rayo(típicamente con una divergencia de la orden de 2 o 3 mili radianes). Por consiguiente, el campo visual del receptor se puede restringir a este ángulo, así reduciendo al mínimo la luz del fondo que incorpora el sistema.

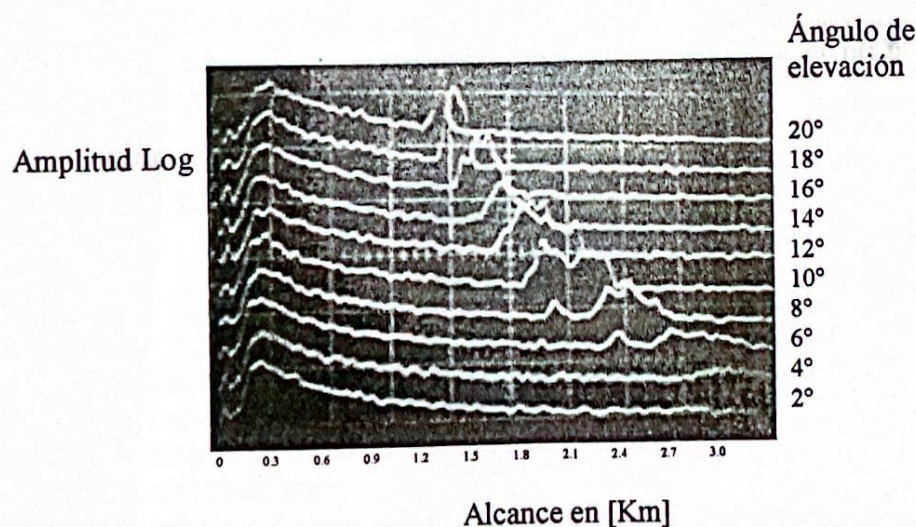
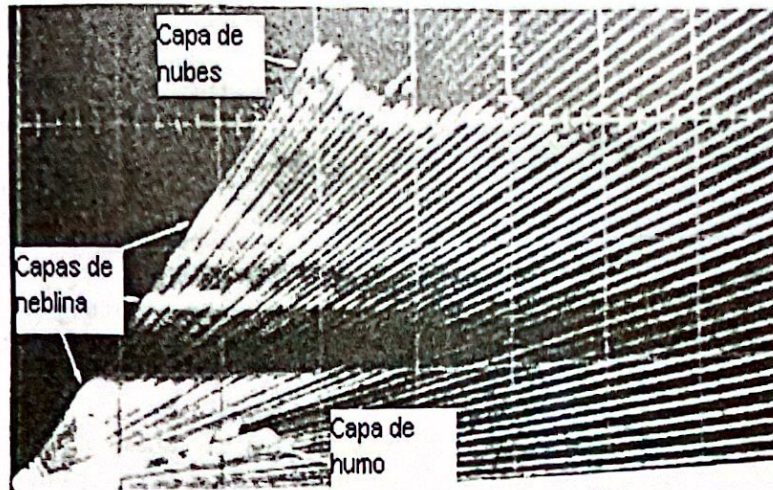


Figura 10. La fotografía de la pantalla de un osciloscopio, muestra la pendiente(intensidad vs. distancia) de las señales de LIDAR recibidas. Los trazos muestra el decremento que depende de la relación $1/R^2$ del retorno del aire limpio. Señales que se incrementan de 1.0 a 2.5Km de distancia son causadas por capas de humo. Hinkley(1976:75).

Altura en [Km]



Alcance en [Km]

Figura 11. La fotografía de la pantalla de un osciloscopio muestra la intensidad modulada del LIDAR obtenida usando un disco de grabación magnético y técnicas de pregrabado. La sección transversal vertical delinea la capa de humo a 1.5Km a favor del viento de una pila de 245m de planta de energía. También es evidente la parte alta de la capa mixta turbia a la altitud de 0.75Km, capas de neblina estratificada en el aire a 1.1 y 1.5Km, y la base de una nube visible a una altitud cercana a 2Km. Límites de atenuación pulsos de penetración dentro de las nubes Hinkley(1976:75).

3.5.1 La ecuación del LIDAR. De acuerdo a Hinkley(1976:76) los principios del LIDAR descritos anteriormente expresan formalmente por la ecuación de la dispersión única del LIDAR:

$$P_r(R) = P_o \left(\frac{c\tau}{2} \right) \beta(R) A_r R^{-2} \exp \left[-2 \int_0^R \alpha(r) dr \right] \quad (3.12)$$

donde

P_r es la potencia instantánea recibida al tiempo t

P_o es la potencia transmitida al tiempo t_o

c es la velocidad de vuelo

τ es la duración del pulso

β es el coeficiente de volumen elástico de dispersión de retroceso de la atmósfera

R es el alcance(límite)

A_r es la área efectiva del receptor

α es el coeficiente de volumen de extinción de la atmósfera (esta es definida como sección transversal por unidad de volumen [cm^2/cm^3], y es numéricamente idéntica al coeficiente de extinción lineal usado en las ecuaciones de transmisión del láser, el cual tiene unidades de cm^{-1}).

La determinación del alcance R y del incremento del límite en el cual regresa y recibe simultáneamente es ilustrado en la Fig.12. Desde que el pulso transmitido tiene una duración finita τ , este ilumina una longitud geométrica finita $c\tau$ de la atmósfera en cualquier instante).

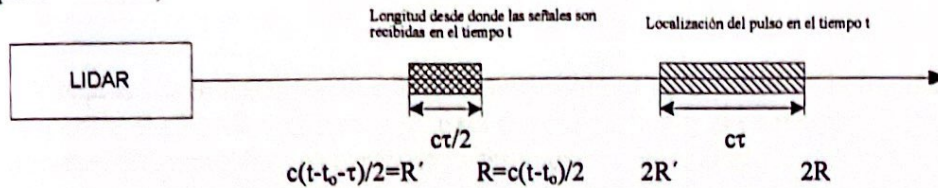


Figura 12. Localización y longitud del incremento en alcance de donde las señales de LIDAR son simultáneamente recibidas en el tiempo t . Los pulsos tienen una duración τ ; el borde anterior fue transmitido en el tiempo t_0 . Hinkley(1976:77).

De cualquier modo, desde que la energía recibida debe viajar la trayectoria en dos vías, la longitud atmosférica (o incremento del límite) en la cual las señales son recibidas a cualquier instante t el cual es la mitad del valor.

Para ilustrar esto cuantitativamente, suponga que el borde anterior (inicial) del pulso es transmitido al instante t_0 . Entonces el máximo alcance desde la cual energía es recibida al instante t es dado por la mitad de la distancia que el borde anterior puede viajar en el tiempo intervenido. Eso es,

$$R = \frac{c(t - t_0)}{2} \quad (3.13)$$

Al mismo instante t , energía adicional se recibe de límites iluminados por porciones del pulso transmitido después del borde principal. Puesto que el borde anterior (final) del pulso fue transmitido en el tiempo $t_0 + \tau$, el alcance mínimo de la energía en el tiempo t esta dado por

$$R' = \frac{c(t - t_0 - \tau)}{2} \quad (3.14)$$

Así la distancia

$$L_p = R - R' = c\tau/2 \quad (3.15)$$

Llamada la "longitud de pulso efectiva", y que es el límite del intervalo desde el cual las señales son recibidas a cualquier instante. Es exactamente la mitad de la longitud iluminada instantáneamente por el pulso, porque es la trayectoria de doble vía que toda energía recibida debe cruzar.

El coeficiente β es el volumen elástico de la dispersión de retroceso y se define como la fracción de la cantidad de energía incidente dispersada por unidad de ángulo sólido (estereorradián) en la dirección contraria expresada por medio de unidades de longitud atmosférica (con dimensionales de $\ell^{-1}sr^{-1}$).

Según Hinkley(1976:78) el área de receptor efectiva A_r se debe a que esta determina el ángulo sólido A_r/R^2 subtendido por el receptor por el límite R (a condición que el ángulo de divergencia del rayo transmisor no exceda el ángulo de aceptación del receptor, toda la energía transmitida esta disponible para la dispersión de retroceso en el límite R).

La expresión siguiente aparece en la ecuación 3.12.

$$\exp\left[-2\int_0^R \alpha dr\right]$$

Y representa la fracción de energía transmitida (T) a lo largo de la trayectoria de doble vía entre el LIDAR y el límite R. Esta dependencia por el coeficiente de volumen de extinción de la atmósfera, representa la fracción por la cual el flujo de energía en la dirección de propagación es reducida y esta dada por unidad de longitud (con dimensionales de l^{-1}). Eso se debe, a la absorción α_a y a la disipación de energía por dispersión α_s . Estrictamente, este término aplica en forma simple cuando la ley de Bouguer's es válida, eso es cuando esencialmente toda la energía dispersada es removida permanentemente de la salida del rayo del LIDAR. Esta simplificación es generalmente utilizada en atmósferas transparentes.

En atmósferas fuertes la dispersión es debida a nubes o niebla espesa y la fracción de energía dispersada que se mantiene, o reingresa, al rayo del LIDAR se puede convertir en significativa. Múltiples correcciones de dispersión para la ecuación de dispersión única pueden efectuarse, con la relación de las propiedades atmosféricas de β y α .

3.5.2 Sistema LIDAR y equipo. La forma básica del LIDAR en su simple configuración esta formada por:

- Láser
- Detectores
- Componentes ópticos
- Adquisición de datos, exhibición y proceso
- Sistema de integración

Esquemáticamente aparece en la figura 9. Extensiones y variaciones del concepto básico siguen a la necesidad particular de aplicación o la exploración de principios más sofisticados. Los sistemas LIDAR ensamblados para tales aplicaciones pueden emplearse en localizaciones fijas y en móviles como vehículos o aviones para trazar mapas y monitorear objetivos atmosféricos sobre áreas amplias por medio de exploración.

- **Láser.** Según Hinkley(1976:79) los primeros LIDAR empleaban láser de rubí o cristal de neodimio de potencia relativamente alta (~1 Joule por pulso), con fuentes de energía cercana a la monocromática y coherente. Mientras que el láser de rubí ($\lambda=694.3\text{nm}$) y el de cristal de neodimio($\lambda=1061\text{nm}$) están limitados a pocos pulsos por segundo, el láser YAG (Granate De aluminio Del Itrio) genera pulsos con 1065nm de longitud de onda en rangos de varios cientos por segundo o más y a energías útiles(0.1J por pulso). Esto ofrece considerables posibilidades para rápida exploración.

Los láser antes mencionados (rubí, cristal del neodimio y YAG) utilizan un cristal como medio para emitir luz. La energía del láser también se puede producir por los diodos de ensambladura. Particularmente por los láser de arseniuro de galio

($\lambda_0=890\text{nm}$), los cuales producen varios cientos de pulsos por segundo en niveles de energía a varios kilovatios en promedio. Al integrar retornos de tales láser, se lleva a cabo un funcionamiento adecuado para la detección de nubes y mediciones de niebla.

La longitud de salida del láser es importante por varias razones, primero porque la porción de energía dispersada por constituyentes atmosféricos depende de la longitud de onda y segundo por las consideraciones de cuidado de los ojos.

Generalmente hablando, la dispersión por partículas atmosféricas y gases es mucho más fuerte en longitudes de onda visible y ultravioleta que en el infrarrojo, considerando que la probabilidad de daño en los ojos es altamente reducida en el infrarrojo. La longitud de onda de salida es especialmente crítica en aplicaciones de absorción diferencial y para otras técnicas dependientes de la longitud de onda. Tales aplicaciones requieren de la capacidad de sintonización o poder variar la longitud de onda de la salida. Esto se ha alcanzado de un gran número de formas, incluyendo la sintonización termal de láser de estado sólido. El rango de longitud de onda más grande está generalmente disponible al usar un láser dye y los osciladores de parámetros ópticos.

Por supuesto, no hay razón por la que tales láser sintonizables no se puedan utilizar en aplicaciones simples de dispersión de retroceso, y en efecto lo han hecho con un láser dye. Porque las técnicas de la conmutación Q(Q switched) no se aplican a los láser dye; los pulsos de la energía generados son normalmente por lo menos de $1\mu\text{s}$ de duración (que limita así la resolución LIDAR al alcance de 150m). Para ciertos propósitos, sin embargo, esto es enteramente tolerable, práctico y eficiente a bajo costo para que los láser de tinte se usen en varias aplicaciones simples del LIDAR.

En parte por razones de seguridad del ojo y para alcanzar en parte sistemas de costo lo más bajo posibles con láser de pulso de alta potencia, el láser de gas con baja potencia de onda continua (continuous wave, cw) ha sido también usado en aplicaciones de LIDAR.

En este enfoque, la información de los límites se derivada de la modulación de energía cw con un patrón de variación de la frecuencia característica, normalmente una modulación de la frecuencia de diente de sierra (frequency modulation, fm). Tales sistemas fm-cw funcionan en el nivel instantáneo de energía muy bajo de la magnitud de una fracción de un watt y son así totalmente seguros para el ojo.

- **Detectores.** De acuerdo con Hinkley(1976:80) al analizar los receptores de sistemas LIDAR, encontramos que el problema crucial esta en la detección eficaz de las intensidades muy reducidas de la energía que retorna. A longitudes de onda visibles y más cortas ($\lambda\approx 200$ a 700nm), el foto multiplicador gradual es más eficiente y se utiliza casi exclusivamente. Aunque marginal es eficaz y también comúnmente usado en sistemas de neodimio ($\lambda=1060\text{nm}$). En la longitud de onda IR (es decir, sobre alrededor de $\lambda\approx 800\text{nm}$), donde los materiales usados en los foto cátodos de foto multiplicadores dejan de ser eficaces, los detectores de fotoconductores de estado sólido se han utilizado con éxito. Son menos satisfactorios y sin embargo los foto multiplicadores usan una longitud de onda más corta. La carencia de detectores eficaces de energía de longitud de onda larga obstaculiza seriamente el uso de tal energía en el desarrollo del LIDAR hasta la fecha.

- **Componentes ópticos.** Los aspectos ópticos de sistemas LIDAR son relativamente directos y siguen la práctica óptica establecida. El uso de la óptica reflexiva se prefiere generalmente en lo posible, aunque los lentes refractivos se utilizan extensamente y con las capas apropiadas para la transmisión de los aumentos de la energía monocromática del láser. La exclusión de la energía indeseada de la luz del fondo por el uso de filtros de banda estrecha se limita comúnmente entre el 0.5 al 1mm de cualquier lado de la longitud de onda central. Filtros más estrechos conducen a veces a la dificultad que los láser de estado sólido desde la emisión de la longitud de onda tiende a variar como resultado de efectos termales.

- **Adquisición de datos, exhibición, y proceso.** Los métodos de grabación y de presentar datos recibidos de la señal son un aspecto importante de mediciones de LIDAR. Aunque la fotografía (particularmente, fotografía polaroid) de tales señales, como se exhibe en un osciloscopio, se mantiene en uso común, técnicas más sofisticadas de la presentación de los datos es ahora ordinaria y se está realzando perceptiblemente la utilidad de datos del LIDAR. El uso de discos magnéticos para grabar el retorno de cada pulso, y de proporcionar reiterada la información impresa para la exhibición de las señales del LIDAR sobre la pantalla del tubo catódico (CRT) fue un primer ejemplo de tales técnicas.

La grabación del disco magnético es capaz de proporcionar flexibilidad considerable en la forma de presentación sobre una base virtual en tiempo real así como prever un almacenamiento más permanente de datos. Un ejemplo de intensidad-modulada "pictórica" exhibida la proporciona la Fig. 11. Los discos magnéticos usados, sin embargo, tienen un ancho de banda limitada a aproximadamente 4MHz y no se pueden acomodar así completamente a la resolución del límite inherente en las señales típicas del los LIDAR con pulso de rubí y el de neodimio. Estas necesitan anchos de 50MHz para coincidir con el de pulsos de 20ns.

Señales muy débiles detectadas por los foto multiplicadores toman la forma de serie de pulsos del fotoelectrón más bien que una corriente continua. La intensidad de la señal en estos casos es dada por la velocidad de la generación de tales pulsos. Tales señales se pueden procesar directamente en forma digital por técnicas de cuenta-pulso y un número de sistemas emplean tales métodos. Más recientemente señales análogas de intensidad alta se han convertido a la forma digital y se han procesado por consiguiente más recientemente. El registro de datos en forma digital, con el cómputo en tiempo real y el listado de productos cuantitativos de las informaciones en bruto, se conserva en la presentación gráfica directa de datos conducida en forma digital, desplegando el CRT la intensidad modulada. Según se ilustra en Fig.13, el sistema está ensamblado con componentes comercialmente disponibles, incluyendo un control digitalizador de la señal, una mini computadora, una unidad del almacenaje de cinta magnética, un monitor de TV y de un teclado de control de teletipo.

- **Sistema de integración.** Según Hinkley(1976:82) la integración óptima de los componentes descritos anteriormente dentro de un sistema completo LIDAR es determinada por la aplicación que se desea. Correspondiendo a la amplia gama de aplicaciones LIDAR, como consecuencia se han desarrollado una gran variedad de tipos de sistema.

Especificaciones detalladas de muchos de estos sistemas se han publicado. Para proveer ejemplos concretos de lo que es posible, las características completas de tres diferentes sistemas son descritas a continuación y listadas en la tabla 1.

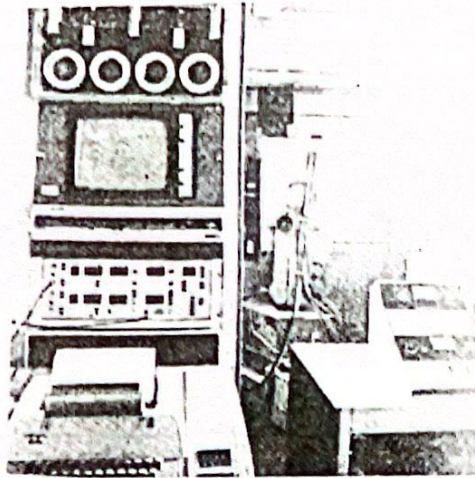


Figura 13. Un sistema LIDAR avanzado de adquisición de datos digital, procesamiento y despliegue de información. Hinkley(1976:82).



Figura 14. Muestra la fotografía de una porción del sistema LIDAR SRI Mark IX. Este sistema fue inicialmente diseñado para la atmósfera baja (debajo de 15Km) estudios de dispersión de retroceso elástica, emplean un láser de rubí en la configuración óptica mostrada en la figura 8 para permitir verdaderamente la geometría coaxial transmisor/receptor. El ensamblaje integrado por transmisor receptor esta montado sobre un pedestal que provee monitoreo automático en ambos ángulos, elevación y azimut. Señales recibidas pueden grabarse simultáneamente usando ambos sistemas, el digital descrito anteriormente (Fig. 13) y el sistema analógico de disco magnético. (En la Fig. 14 el grabador de discos de video aparece bajo la mesa y el manipulador de datos y pantalla están montados sobre el rack de la derecha). El sistema completo es montado sobre un camión, complementado con un generador de potencia, para permitir su operación en sitios remotos y mientras se mantiene en movimientos a lo largo de las carreteras. Hinkley(1976:83).

Tabla 1: Especificaciones de tres sistemas LIDAR de investigación según Hinkley(1976:84)

	SRI Mark IX Sistema móvil	Univ. de West Indies Sistema de atmósfera superior	NCAR-Wisconsin Sistema compacto de tinte
Transmisor			
Longitud de onda	694nm	694nm	585nm
Láser	Rubi(1.0x7.6cm rod)	Rubi(1.9x22.9cm rod)	Tinte(Rhodamine 6 G)
Ancho de rayo	<3/4mRad	0.28mRad	~2mRad
Óptica	Expansor de rayo galileano incluyendo espejo coaxial con telescopio receptor	Lente convexo y espejo parabólico	(Ver Fig.4.7)
Energía del pulso	1.0J	7-10J	0.25J
Longitud del pulso	30ns	10 μ s	<1 μ s
Frecuencia de repetición del pulso	60min ⁻¹	10min ⁻¹	60min ⁻¹
Receptor			
Óptica	Reflector newtoniano	Reflector mosaico Newtoniano (36 espejos individuales)	Lente de Fresnel con diafragma y lentes de colimación
Área	~180cm ²	16m ²	~1100cm ²
Campo de visión	1.0 to 5.5mRad	0.78mRad	~3mRad
Ancho de predetección de filtro pasabanda	1nm	2nm	1nm
Detector	RCA 7265PMT	4EMI 9558 PMT's	EMI 9658PMT
Almacenamiento, procesamiento y presentación de datos	1. Sistema análogo: amplificación logarítmica; ganancia seleccionable compensación(1/R ²); almacenamiento en disco magnético; intensidad modulada o pantalla estándar de osciloscopio, coordenadas cartesianas o polares, directo o de lo almacenado en disco. 2. Sistema digital: señal transitoria digitalizada; minicomputadora; almacenamiento en cinta magnética, monitor de TV; control por medio de teclado	Contador de pulsos a cada intervalo de tres altitudes, cada uno conectado a un detector separado.	Amplificador con switch de ganancia; señal digital transiente; cinta de almacenamiento de papel
Modo de operación	Base en tierra, fija o móvil. Disponibilidad de monitoreo automático	Base en tierra, fija	Base en tierra o aérea

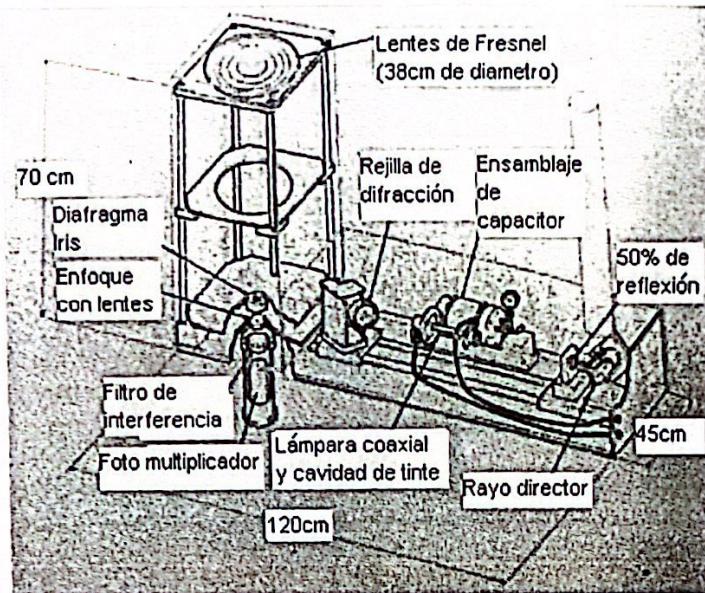


Figura 15. Diagrama esquemático mostrando los elementos principales de la unidad de transmisor/receptor de un compacto radar láser dye. Dimensiones aproximadas de la unidad son mostradas; la unidad pesa alrededor de 64Kg. Hinkley(1976:86).

El sistema según Hinkley(1976:86) está diseñado para bases en tierra para estudios de la atmósfera superior (~20 a 100 Km) y enfatiza la máxima sensibilidad, contrario de la movilidad o capacidad de afinar puntería.

Para alcanzar alta sensibilidad, se utiliza un láser de rubí de muy alta potencia(>7 J/pulso) y un sistema de espejo receptor con área de ~14 m² construido como un mosaico de 36 espejos individuales, cada uno de 0.7 m de diámetro. La adquisición de datos es por conteo de pulsos y usando una combinación de varios fotomultiplicadores para incrementar el sistema dinámico de alcance.

Un tercer tipo de sistema, utiliza un láser dye y es esquemáticamente ilustrado en la Fig. 15. El uso del láser de dye y de los lentes Fresnel como receptores ópticos dan como resultado un sistema que es relativamente compacto, peso ligero, seguro y de bajo costo. El sistema fue montado en un avión de investigación, permitiendo mediciones rápidas de grandes extensiones de volumen atmosférico. El sistema de adquisición utiliza un amplificador de ganancia de conmutación en combinación con digitalizador de señal transitoria disponible comercialmente.

3.5.3 Seguridad ocular. Según Hinkley(1976:87) la primera decisión a considerar es en la operación y seguridad pública en estudios de LIDAR es el riesgo del daño en la retina del ojo. La probabilidad de daño de retina depende de la energía del pulso, longitud de onda y el tiempo de exposición. Considerando que concentraciones extremadamente altas de la energía del láser de cualquier longitud de onda pueden causar lesiones sobre la piel y en la superficie de la cornea. Tales concentraciones no son normalmente usadas en aplicaciones de LIDAR.

Por otro lado, daños significativos en la retina pueden resultar de típicos pulsos de energía (~ 1 J) y duraciones usadas por muchos LIDAR de longitud de onda visible a niveles de alcance de decenas de kilómetros. Más aun el peligro se incrementa por efectos de turbulencia atmosférica. Estas pueden causar enfoque local intermitente del rayo de energía. En longitudes de onda superiores a la visible, desenfoques sucesivos del la energía del láser para el ojo reducen el riesgo de lesión para una sensible retina y para longitudes de onda superiores a la $1.4 \mu\text{m}$ el material del ojo absorbe la energía antes de que alcance la retina. Como consecuencia los LIDAR con seguridad ocular deben operar en bajas intensidades en rangos de visible o cercano a visible o funcionar en longitudes de onda mucho más grandes. Se utiliza generalmente por esta razón el láser Erbium, que genera energía a $1.54 \mu\text{m}$. Los criterios de seguridad específicos para la operación del láser han sido promulgados por el Instituto Nacional Americano de Normas (American National Standards Institute).

3.5.4 Interacciones atmosféricas que determinan la señal recibida del LIDAR. La atmósfera determina la recepción de la señal de LIDAR de dispersión de retroceso a través de dos factores que aparecen en la ecuación (3.12). El coeficiente de volumen elástico de dispersión de retroceso β y el coeficiente de atenuación α . Inversamente, las mediciones efectuadas por el LIDAR en la longitud de onda transmitida λ_0 pueden proporcionar información de ambos; en la dispersión elástica de retroceso y en las características atenuantes de la atmósfera y brindando estos dos efectos puedan ser separados de alguna manera. La relación entre β y α para la composición atmosférica y del estado se explora posteriormente en las secciones 3.5.4.1 y a 3.5.4.2.

En sentido estricto, la dependencia funcional dada por la ecuación (3.12) de P_r sobre β y α es válida solamente bajo condiciones donde cada fotón recibido ha sido dispersado una vez. Las condiciones atmosféricas satisfacen con frecuencia este requisito a un alto grado y las situaciones prácticas ocurren en que dispersión múltiple puede tener efectos importantes en la medida de la señal LIDAR. Estos efectos en la modificación de la señal LIDAR recibida del valor predicho por la convencional ecuación del LIDAR de dispersión individual la ecuación (3.12) se discute en la sección 3.5.4.3.

3.5.4.1 Dispersión elástica de retroceso. De acuerdo a Hinkley(1976:89) el coeficiente de volumen dispersado es la suma de contribuciones de ambas fases de la atmósfera, es decir la de partículas y la gaseosa.

$$\beta = \beta_g + \beta_p \quad (3.16)$$

donde el subíndice g es para los gases y p por las partículas. Estas contribuciones son discutidas posteriormente.

Dado que el tamaño de las moléculas de gas es muy pequeño comparado con todas las longitudes de onda de líneas de absorción, se pueden describir por la dispersión de Rayleigh aproximada. Por,

$$\beta_g = \beta_R = N_g d\sigma_R(\pi) / d\Omega \quad (3.17)$$

donde $N_g = 2.55 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ es el número de moléculas de gas por unidad de volumen y $d\sigma_R(\pi) / d\Omega$ es la dispersión diferencial Rayleigh de sección transversal, para el ángulo dispersado $\theta = \pi$, por el promedio de molécula de gas. Para la mezcla de gases atmosféricos el cual ocurre abajo de 100 Km.

$$d\sigma_R(\pi) / d\Omega = 5.45[\lambda(\mu\text{m}) / 0.55]^{-4} \times 10^{-28} \text{ cm}^2 \text{ sr}^{-1} \quad (3.18)$$

Esta ecuación muestra la dependencia de la longitud de onda característica λ^{-4} de la dispersión Rayleigh, y descuida una dependencia muy leve adicional a la de longitud de onda debida a la dispersión del índice de refracción del aire. Al nivel del mar, donde el valor de la densidad molecular es $N_g = 2.55 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$, de las ecuaciones (3.17) y (3.18) tenemos

$$\beta_g = \beta_R = 1.39[\lambda(\mu\text{m}) / 0.55]^{-4} \times 10^{-8} \text{ cm}^{-1} \text{ sr}^{-1} \quad (3.19)$$

Según Hinkley(1976:90) el coeficiente de volumen de dispersión de retroceso es suficientemente grande para producir señales medibles en LIDAR de modesta capacidad.

Como se vera en al subsección 3.5.4.2, el coeficiente Rayleigh de dispersión de retroceso es una constante múltiple del coeficiente de atenuación Rayleigh, con

$$\beta_R = \frac{1.5}{4\pi} \alpha_R = 0.119 \alpha_R \quad (3.20)$$

de lo anterior medir y efectuar la conversión de β_R y α_R puede realizarse rápidamente. Más aun, la simple relación de la ecuación (3.17) muestra que mediciones de β_R pueden usarse para medir la densidad atmosférica N_g .

Para longitudes de onda de líneas de absorción de gases específicos la dispersión resonante puede ocurrir, produciendo un incremento en el coeficiente de dispersión elástica de retroceso de varios órdenes de magnitud.

En el proceso de dispersión resonante, el tiempo característico entre la incidencia del fotón y la re-emisión es varias veces en magnitud más grande que por el proceso de dispersión Rayleigh, y es en realidad algo más largo que el tiempo entre las colisiones moleculares en la troposfera.

Como resultado, las colisiones de moléculas de absorción resonante no causan radiación, así que la resonancia efectiva de dispersión de retroceso posee una sección transversal muy pequeña para poder ser observada en la troposfera.

En la atmósfera superior ($\geq 50\text{Km}$), donde las colisiones moleculares son menos frecuentes, la dispersión de resonancia (elástica) no es apagada o extinguida. Resonancia de dispersión de retroceso es usada para observar concentraciones de sodio y potasio atómico en altitudes entre 80 y 110Km.

Como se mencionó anteriormente según Hinkley(1976:91), a altitudes debajo de pocos kilómetros las concentraciones típicas de partículas aerotransportadas dan lugar a un coeficiente de partículas de dispersión de retroceso β_p que frecuentemente excede al componente gaseoso β_g .

En esta sección, utilizaremos el término “particular” para describir cualquier líquido u objeto sólido que no proporcione su propio significado de locomoción en la atmósfera. De esta manera se excluyen, por ejemplo, aviones e insectos, pero se incluye neblina y partículas de humo, niebla, gotas y cristales de nubes e incluso más grandes hidrometeoros como gotas de lluvia y escamas de nieve. Las partículas atmosféricas alcanzan dimensiones lineales desde $0.001 \mu\text{m}$ a 10mm o más grandes.

Típicamente, partículas con la dimensión lineal más pequeña de pocas micras que pueden mantenerse suspendidas en la atmósfera por largos periodos de tiempo, del orden de días. Estas partículas, juntas con las moléculas de gas de la atmósfera, forman una suspensión coloidal, o en el lenguaje de química coloidal un aerosol.

Con frecuencia científicos atmosféricos se refieren a las partículas suspendidas por si solas como “aerosoles”, pero esta terminología puede conducir a confusión en las discusiones de dispersión de luz. Por lo tanto, utilizaremos el término “aerosol” para describir moléculas de gas y partículas suspendidas colectivamente, y nos referiremos a las partículas suspendidas como “partículas aerosol”.

Las partículas de aerosol atmosférico varían extensamente en fuente y en composición así como en tamaño. Los procesos antropogénicos contribuyen con tales materiales como humo con cenizas, la explotación minera y polvos de moler, y gotas líquidas producidas foto químicamente por productos de combustión de gases automotrices. Por otro lado, polvo volcánico, polvo meteórico, esporas y semillas, sal de mar, y polvo del suelo terrestre son de origen natural, y por supuesto en su mayoría son gotas de agua y partículas de hielo.

Como en el caso de moléculas gaseosas, la dispersión de luz por partículas que son más pequeñas comparadas que la longitud de onda (i.e., radio de $\leq 0.05 \lambda$) es descrita por la aproximación de dispersión Rayleigh. En la atmósfera de cualquier modo, óptimamente las partículas más significativas son usualmente muy grandes para ser descritos por dispersores Rayleigh.

Las propiedades de dispersión de luz de estas grandes partículas son difíciles y casi imposibles de describir exactamente esto se debe a que por naturaleza tienen una gran variación en forma, composición y tamaño de distribución.

Para partículas de tamaño arbitrario y forma, y composición no homogénea, una solución analítica para el problema de dispersión electromagnética no está disponible. Sin embargo, muchas partículas atmosféricas (i.e. niebla y gotas de lluvia, y gotitas de niebla contaminada con humo (smog) fotoquímico) son esencialmente esferas homogéneas.

Además información útil sobre las características de la dispersión de luz de otras partículas pueden ser derivadas tratándolas de forma equivalente como esferas homogéneas. Por lo tanto, las propiedades de la dispersión de retroceso de partículas esféricas homogéneas proporcionan un punto de partida importante para una descripción más completa de la dispersión de retroceso por aerosol atmosférico general.

Según Hinkley(1976:92) el coeficiente de volumen de dispersión trasero de una suspensión de esferas homogéneas de varios tamaños(i.e., una "poli dispersión esférica"), cuando es iluminada por luz de longitud de onda λ está dada por

$$\beta_p(\lambda) = \int_0^{\infty} \sigma_B(a, \lambda, m) N'_p(a) da \quad (3.21)$$

donde $\sigma_B(a, \lambda, m)$ es la sección transversal de dispersión de retroceso de una particular de radio a e índice de refracción m , y $N'_p(a)da$ es el número de partículas por unidad de volumen con radio entre a y $a+da$. Se utiliza el símbolo σ_B aquí por conveniencia; en nuestra notación anterior tenemos

$$\sigma_B = d\sigma(\pi)/d\Omega. \quad (3.22)$$

Además, la distribución del tamaño de particular $N'_p(a)$ está relacionado con el número total de partículas N_p por

$$N_p = \int_0^{\infty} N'_p(a) da \quad (3.23)$$

El índice de refracción m es en general un número complejo,

$$m = n - i\kappa \quad (3.24)$$

donde la parte imaginaria κ es una medida la absorbancia de la partícula.

La dependencia de la sección transversal de la dispersión de retroceso σ_B sobre a, λ y m fue estudiada por científicos a finales del siglo diez y nueve. Actualmente, la dispersión por partículas homogéneas esféricas de tamaño arbitrario (y especialmente con $a/\lambda \geq 0.1$) es referido como "*Dispersión Mie*", después de que Mie publicara una solución en 1908.

3.5.4.2 Atenuación. De acuerdo a Hinkley (1976:97) la atmósfera atenúa el pulso del láser a través de dispersión y absorción por gases y partículas. Así el coeficiente de extinción(atenuación) puede escribirse como la suma de cuatro términos

$$\alpha = \alpha_{g,s} + \alpha_{p,s} + \alpha_{g,a} + \alpha_{p,a}, \quad (3.25)$$

donde los subíndices s, a, g, y p aparecen respectivamente por scattering(dispersión), absorción, gases, y partículas.

Estos cuatro términos pueden agruparse en pares como

$$\alpha_g = \alpha_{g,s} + \alpha_{g,a}, \quad (3.26)$$

$$\alpha_p = \alpha_{p,s} + \alpha_{p,a}. \quad (3.27)$$

Los coeficientes de extinción para gases y partículas α_g y α_p son descritos más a detalle posteriormente.

Según Hinkley(1976:98) el coeficiente de atenuación $\alpha_{g,s}$ debido a la dispersión por moléculas de gas, tiene componentes elástico e inelástico. Pero el componente elástico es siempre dominante (por varios ordenes de magnitud como máxima longitud de onda) y el componente inelástico es típicamente despreciable. Como se mencionó en el inicio, el tamaño de las moléculas de gas es pequeño en comparación con las longitudes de onda de la radiación del láser, dispersión elástica por gases es descrita por la sección transversal de dispersión Rayleigh σ_R , i.e.,

$$\alpha_{g,s} = \alpha_R \equiv N_g \sigma_R, \quad (3.28)$$

Donde N_g es el número de densidad de moléculas de gas del volumen atmosférico de interés. Para luz con longitud de onda λ , la sección transversal de dispersión atmosférica Rayleigh a altitudes debajo de 100 Km. Esta dado por

$$\sigma_R = 4.56(\lambda[\mu m]/0.55)^{-4} \times 10^{-27} \text{ cm}^2 \quad (3.29)$$

El coeficiente de absorción gaseosa $\alpha_{g,a}$ es una función de la longitud de onda, convirtiéndose en el componente dominante del coeficiente de extinción α en la vecindad de las líneas de absorción y bandas de varios gases atmosféricos. Estas fuertes características de absorción ocurren con más frecuencia en las regiones del espectro, ultravioleta ($\lambda < 300nm$) e infrarrojo ($\lambda \geq 900nm$), donde ellos pueden severamente limitar el alcance efectivo del láser para medición y detección remota. Por otro lado, estas características espectrales pueden explorarse con la técnica de absorción diferencial para proveer mediciones remotas de constituyentes gaseosos específicos, como se describe en la sección 3.5.5.

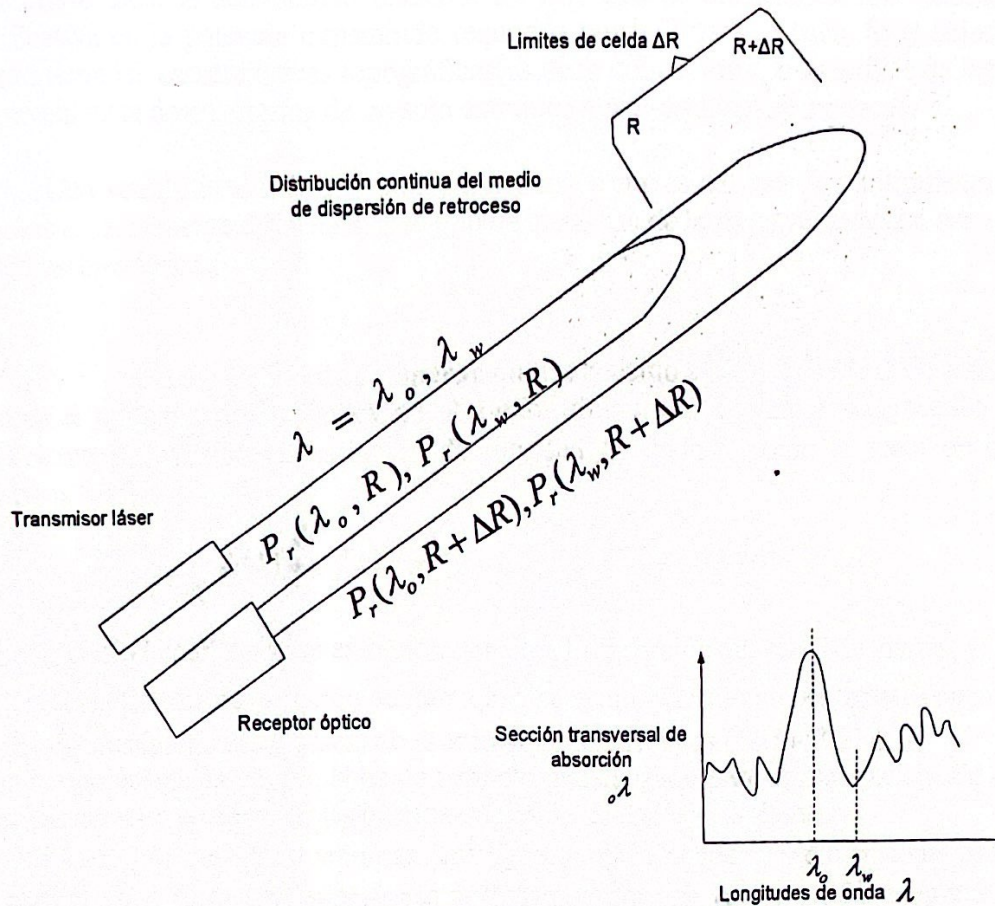


Figura 16. La técnica del LIDAR de absorción diferencial. Hinkley(1976:102).

3.5.5 Técnica LIDAR de absorción diferencial. Según Hinkley(1976:102) la dependencia de la señal LIDAR recibida sobre el término de atenuación de dos vías $\exp(-2\int \alpha dr)$, puede utilizarse para resolver una amplia gama de componentes gaseosos específicos en apreciables magnitudes y con sensibilidad potencialmente alta. Como se ilustra en la Fig.16, el método está basado en la fuerte dependencia a la longitud de onda del coeficiente de absorción gaseoso $\alpha_{g,a}$ en la vecindad de la línea de resonancia de absorción, junto con la dispersión de retroceso elástica que retorna de partículas y gases atmosféricos. Usando un láser sintonizable, mediciones cercanas a lo simultáneo se efectúan sobre la misma ruta de longitudes de onda. ($\lambda = \lambda_0, \lambda_w$) dentro y fuera de una apropiada línea de absorción del gas que ha sido medido.

Las señales que resultan luego son comparadas para aislar la absorción por gas de interés sobre otros componentes en extinción en la atmósfera. El método fue iniciado por Schotland, quien lo llamó Absorción Diferencial de Energía Dispersada (Differential Absorption of Scattered Energy), o DASE. Varios otros investigadores han usado la terminología LIDAR de Absorción Diferencial (Differential Absorption Lidar) o DIAL, Absorción Diferencial y Dispersión (Differential Absorption and Scattering) o DAS, o simplemente absorción diferencial.

La técnica puede ser también usada para obtener una trayectoria integrada de concentraciones de especies gaseosas al medir la señal desde un objetivo remoto fijo, hasta cierto alcance atmosférico resuelto. En este tipo de mediciones, una reducción significativa en la potencia transmitida requerida puede llevarse a cabo. Si el objetivo remoto tiene las características topográficas (es decir colina, torre, o superficie de lago), la conveniencia de un sistema de un solo extremo (mono-estático) se mantiene.

Una sensibilidad más alta puede obtenerse a través del uso de retroreflectores remotos especialmente diseñados; este tipo de medición de larga trayectoria con dos extremos (bi-estático).

3.5.5.1 Principio de operación. De acuerdo a Hinkley (1976:103) para ilustrar el principio de la técnica de absorción diferencial iniciamos por describir el coeficiente atmosférico de extinción de longitud de onda λ como la suma de dos términos

$$\alpha(\lambda) = \alpha_A(\lambda) + \alpha_G(\lambda) \quad (3.30)$$

donde α_G es el coeficiente de extinción debido a la absorción del gas G de interés, y α_A es el coeficiente de extinción debido a la dispersión y absorción por todos los demás constituyentes (partículas y gases) de la atmósfera [coeficientes (3.25)-(3.27)]. Para la concentración de gas, N es un símbolo generalizado para concentración. En los cálculos actuales puede tener las dimensionales de unidades de volumen [l^{-3}] o masa por unidad de volumen [$m l^{-3}$], o también puede ser adimensional razón mezclada, así σ tiene las dimensiones apropiadas para que α_G tenga dimensiones de longitud inversa [l^{-1}]. Si N tiene dimensiones [l^{-3}], σ es la sección transversal de absorción con dimensional [l^2]; Si N tiene dimensional [$m l^{-3}$], σ es el coeficiente de absorción con dimensional [$m^{-1} l^2$]; Si N es una razón mezclada, σ tiene dimensional [l^{-1}]. Con N y la sección transversal de absorción σ tenemos

$$\alpha_G(\lambda) = N\sigma(\lambda) \quad (3.31)$$

Una expresión para $N(R)$ promedio sobre los límites de la celda ΔR pueden obtenerse por sustitución de (3.30) y (3.31) en (3.12), y luego formar la diferencia de los logaritmos de $P_r(\lambda, R)$ y $P_r(\lambda, R + \Delta R)$ para ambos con longitudes de onda λ_0 .

Con línea de absorción de gas G y longitud de onda λ_w sobre el ala (wing) de la línea (i.e., fuera de la punta principal de absorción). Por un número de razones (evitar la obstrucción de absorción por otros gases, y lograr el alcance óptimo), las longitudes de onda λ_0 y λ_w no deben caer en las idealizadas posiciones de "pico" y "valle" esquematizadas en la Fig. 16).

De esta manera, obtenemos

$$\ln P_r(\lambda_0, R) - \ln P_r(\lambda_0, R + \Delta R) = \ln \beta(\lambda_0, R) - \ln \beta(\lambda_0, R + \Delta R) + 2\Delta R \left[\bar{\alpha}_A(\lambda_0) + \bar{N}\sigma(\lambda_0) + R^{-1} \right] \quad (3.32)$$

$$\ln P_r(\lambda_w, R) - \ln P_r(\lambda_w, R + \Delta R) = \ln \beta(\lambda_w, R) - \ln \beta(\lambda_w, R + \Delta R) + 2\Delta R \left[\overline{\alpha}_A(\lambda_w) + \overline{N} \sigma(\lambda_w) + R^{-1} \right] \quad (3.33)$$

la cual puede resolverse dejando

$$\overline{N}(R) = \frac{1}{2\sigma\Delta R} \left[\ln \left(\frac{P_r(\lambda_o, R)}{P_r(\lambda_o, R + \Delta R)} \right) - \ln \left(\frac{P_r(\lambda_w, R)}{P_r(\lambda_w, R + \Delta R)} \right) + B' + T' \right] \quad (3.34)$$

donde

$$T' = -2 \left[\overline{\alpha}_A(\lambda_o, R) - \overline{\alpha}_A(\lambda_w, R) \right] \Delta R \quad (3.35)$$

$$B' = \ln \left[\beta(\lambda_o, R + \Delta R) / \beta(\lambda_o, R) \right] - \ln \left[\beta(\lambda_w, R + \Delta R) / \beta(\lambda_w, R) \right] \quad (3.36)$$

$$\sigma = \sigma(\lambda_o) - \sigma(\lambda_w) \quad (3.37)$$

la barra sobre el símbolo indica la cantidad promedio correspondiente sobre los límites ΔR .

Así $\overline{N}(R)$ puede determinarse por medición de dos longitudes de onda de LIDAR usando la ecuación (3.34), proporcionando la transmisión diferencial y la dispersión de retroceso en términos de T y B, y la sección transversal de absorción diferencial σ como la conocemos. En principio, σ puede determinarse en forma avanzada por medio de mediciones de laboratorio o de datos publicados.

Por otra parte, si la dependencia espectral de α_A y β es débil en la región de longitudes de onda $\lambda = \lambda_o$ a λ_w , y si las mediciones de línea y ala son efectuadas casi simultáneamente (para evitar cambios temporalmente significativos en α_A y β), B y T pueden considerarse efectivamente cero. La validación de esto y otras asunciones se discuten en la sección 3.5.5.3. Pero primero investiguemos la sensibilidad de la medición del potencial al aplicar la ecuación (3.34).

3.5.5.2 Medición de la sensibilidad. De(3.34), asumiendo que $B'=T'=0$, que la concentración mínima detectable N_{\min} del gas G en el experimento de absorción diferencial esta dado por

$$N_{\min} = \frac{\Delta * \ln}{2\sigma\Delta R} \quad (3.38)$$

Utilizando la sustitución abreviada de $\Delta * \ln$ como el valor mínimo de la diferencia logarítmica en la ecuación (3.34) medida con exactitud. Para propósitos de estimación, la ecuación (3.38) puede describirse en tres formas, cada una correspondiendo a un conjunto diferente de dimensiones para describir N y σ .

Esto es

$$N_{\min} [cm^{-3}] = 5 \cdot 10^{-3} \frac{\Delta^* \ln}{\sigma [cm^2] \Delta R [m]} \quad (3.39)$$

$$N_{\min} [gcm^{-3}] = 5 \cdot 10^{-3} \frac{\Delta^* \ln}{\sigma [cm^2 g^{-1}] \Delta R [m]} \quad (3.40)$$

$$N_{\min} [ppm atm] = \frac{5(\Delta^* \ln)}{\sigma [cm^{-1} atm^{-1}] \Delta R [km]} \quad (3.41)$$

Donde σ esta en la forma mostrada en la ecuación (3.41), este es comúnmente llamado coeficiente de absorción diferencial k , el cual puede obtenerse de $\sigma [cm^2]$ usando

$$k [cm^{-1} atm^{-1}] = N_0 [cm^{-3} atm^{-1}] \sigma [cm^2] \quad (3.42)$$

donde N_0 , es densidad molecular del aire por atmósfera [atm], igual a $2.55 \cdot 10^{19} cm^{-3} atm^{-1}$. Las unidades de concentración detectables mínimas son partes por millón-atmósfera [ppm atm].

Al dar el equipo valores de detección y digitalización razonables para $\Delta^* \ln$ cerca de 0.02. Y ser combinado este valor con varios coeficientes de absorción diferencial de constituyentes atmosféricos y agentes contaminadores da como resultado las concentraciones mínimas detectables mostradas en la Tabla 2.

Los valores para N_{\min} dados en la Tabla 2 son mezcla de razones en unidades de ppm-atm, asumiendo un incremento en los limites de ΔR para 100m. De forma equivalente, todos estos números pueden multiplicarse por 100 y ser expresados en ppm-atm-metro, al ser dados en la forma de la ecuación (3.38), es una medida más fundamental de sensibilidad en el experimento de absorción diferencial.

La forma de la ecuación (3.38) para la concentración mínima detectable esta en marcado contraste para las correspondientes expresiones para concentraciones mínimas detectables en experimentos que miden la concentración de un material a través de su contribución para el coeficiente de dispersión de retroceso β .

En tales experimentos, como por ejemplo los que emplean la dispersión Raman o de fluorescencia, dispersión resonante, o no-resonante dispersión elástica para medir la concentración de dispersión de retroceso de partículas y gases, la concentración mínima detectable es una función creciente de la distancia R entre el constituyente de dispersión y el LIDAR.

La combinación de los efectos de la reducción del ángulo sólido del receptor y la atenuación del rayo causan la detección de la concentración mínima en tales experimentos para incrementarse como mínimo tan rápidamente como R^2 , coeficiente en ecuación (3.12).

Por otro lado según Hinkley(1976:106) en una diferente medición de absorción diferencial, la concentración mínima detectable es independiente del alcance R , mientras la señal de retroceso dispersada por todas las partículas y gases atmosféricos en ambas longitudes de onda sobre la línea y fuera de la línea es suficientemente grande para brindar un termino de diferencia mensurable, coeficiente en ecuación(3.34), el cual excede $\Delta \cdot \ln$.

En límites mayores, una medición puede seguir efectuándose, pero la razón señal-ruido(S/N) causa que $\Delta \cdot \ln$ se incremente con el límite. La gama sobre la cual se mantiene esta condición depende de la longitud de onda transmitida (ultra violeta UV, visible, o infrarrojo IR) y del contenido de las partículas atmosféricas.

De cualquier modo, aun para partículas al aire libre al nivel del mar, varios sistemas de LIDAR dye(ver Tabla 1) existen para las cuales la señal recibida en longitudes de onda visible y UV encuentran este criterio fuera de los límites de varios Kms. o más.

En longitudes de onda más larga (donde ocurren muchas líneas de absorción), el coeficiente atmosférico de dispersión de retroceso β reduce el alcance posible para mediciones resueltas espacialmente, pero el uso de objetivos topográficos permite la medición de trayectorias integradas en estos casos.

Las concentraciones mínimas listadas en la Tabla 2 indican que la técnica de absorción diferencial puede utilizarse para medir la concentración de varios gases atmosféricos, a niveles de ambiente urbano en regiones en las cuales están separadas por varios Km. del LIDAR detector.

Tal capacidad hace a la absorción diferencial potencialmente la más sensitiva de los esquemas de un solo extremo para la detección láser de vestigios de gas a presión troposférica.

De cualquier modo, gran variedad de estas comparaciones han aparecido recientemente en la literatura, y han llegado a la conclusión que la capacidad de medición de la absorción diferencial de tales gases como CO y NO₂ es de 10⁴ a 10⁵ veces tan sensible como las mediciones de dispersión de retroceso fluorescente.

Este incremento en sensibilidad ocurre como resultado de combinar una gran absorción de sección transversal (relativa a la dispersión Raman) de gases comunes y la fácilmente observable respuesta o retorno de la dispersión elástica de retroceso de las partículas y gases(u objetivos topográficos), ambos de los cuales son explotados en el método de absorción diferencial.

Tabla 2: Concentraciones detectables mínimas de varios gases atmosféricos usando la técnica de LIDAR de absorción diferencial; para definiciones ver ecuaciones 3.41 y 3.42 Hinkley(1976:106).

Especies	Longitud de onda λ [μm]	Coeficiente de absorción diferencial k [$\text{cm}^{-1} \text{atm}^{-1}$]	Concentración mínima detectable con límites de celda de 100m **	Concentraciones atmosféricas típicas	
				Urbano [ppm]	Rural [ppm]
H ₂ O vapor	0.6944	0.00035	3000	4000-30000	4000-30000
CO	2.3	0.4	2.5	1-100(15 típicas)	0.3-1.0
CO	4.74	10	0.1		
NO ₂	0.45	7.2	0.4	0.01-0.3	0.001-0.005
SO ₂	0.3	26	0.04	0.01-0.3	0.01
	7.4	16	0.06		
	8.88	1	1		
C ₆ H ₆	0.25	33	0.03		
O ₃	0.29	12	0.08	0.04-0.5	0.03-0.06
O ₃	9.48	10.8	0.1		
NH ₃	10.7	30	0.03		0.005-0.02
NO	0.226	7	0.14	0.01-0.3	0.001-0.005
NO	5.2	4	0.25		
NO	5.31	10	0.1		
NO	5.5	1.2	0.8		
CH ₄	3.39	15	0.07		

Nota:

** Del cálculo con la ecuación 3.38 se asume que $\Delta \ln = 0.02$ y $\Delta R = 0.1 \text{Km}$

3.5.5.3 Errores potenciales. Según Hinkley(1976:107) la discusión sobre la sensibilidad presentada, es lo ideal sin embargo la ocurrencia en cualquier medida real de los errores y de las incertidumbres, no todas aparecen explícitas por (3.34). Recientemente, estos errores potenciales han sido investigados en cierto detalle por Schotland. En esta sección presentamos una sinopsis de sus resultados.

Schotland evaluó incertidumbres en las mediciones de concentración, dadas las incertidumbres que se presentaban en la dispersión de retroceso diferencial y en los términos B' y T' , en el coeficiente de absorción σ y energía medida P_e . El primero demostró que para típicas líneas de absorción gaseosa con una diferencia de frecuencia $\Delta\nu \leq 0.3 \text{cm}^{-1}$ entre la línea de centro y el extremo, la dependencia de la longitud de onda de la dispersión de retroceso atmosférica β y de la extinción α (debido a la dispersión gaseosa y de partículas asimismo a la absorción) es suficientemente débil (menos veloz que λ^{-1}) eso en medidas exactamente simultáneas, las diferencias $\beta(\lambda_s) - \beta(\lambda_r)$ y $\alpha(\lambda_s) - \alpha(\lambda_r)$ son realmente insignificantes (diferencias relativas de $\leq 10^{-4}$), brindando absorción por los otros gases y es esencialmente constante para $\lambda_s \leq \lambda \leq \lambda_r$. Más importante que la variabilidad espectral de β y α es su variabilidad temporal debido a la fluctuación natural en el contenido de partículas atmosféricas.

Según Hinkley(1976:108), Schotland demostró que con una exactitud relativa en N del 10% o deseablemente mejor(para un par de tiros $\lambda_o - \lambda_w$), el intervalo de tiempo entre la línea de centro y las de los extremos se mantendrá en el orden de milisegundos o aun menor. Si esta condición se satisface, Schotland concluye en que los términos B' y T' en la ecuación(3.34) puede tomarse como ceros.

Schotland obtuvo expresiones para la incertidumbre en N , debido a incertidumbres en σ y P , y las aplicó en las dimensiones con base en tierra de perfiles verticales de vapor de agua usando un LIDAR de rubí ajustable y fuera de la línea de absorción en la longitud de onda $\lambda = 694.38nm$. El demostró en este caso que las incertidumbres en σ debido a incertidumbres en la temperatura y presión del volumen atmosférico que ha sido investigado tiene efectos insignificantes en la exactitud de N (un error relativo de $\sim 1\%$ para un par de mediciones).

Sin embargo incertidumbres en σ debido a incertidumbres en la longitud de onda de salida del láser de rubí son una fuente de error significativa, llegando al 3% al nivel del mar hasta 6% en altitudes de 3Km (donde la línea de absorción es más angosta). En realidad a altitudes de 2Km o menores este error es dominante en la simulación que efectúa Schotland.

Por otra parte para altitudes de 3Km la señal recibida en línea $P_r(\lambda_o)$ para el sistema LIDAR asumido llega a ser bastante pequeña en comparación a la luz del fondo del cielo convirtiéndose en errores de medición de potencia dominantes. Produciendo un error relativo en N de 9% incluso cuando la variación es deducida por medio de un promedio de 25 pares de medidas.

Este análisis general demuestra que las incertidumbres que se presentan de una fuente dada pueden ser insignificantes en un tipo particular de medición, pero puede convertirse de hecho en la fuente del error dominante en otro tipo de medición. Así por ejemplo, el análisis de error para un experimento que usa longitudes de onda visibles puede ser completamente diferente en forma que para la medición hecha en el infrarrojo.

Los efectos de interferencia que ocurren cuando un material con excepción del gas de interés tiene una dependencia significativa en la longitud de onda en la región de $\lambda = \lambda_o$ a λ_w estos tienden a ocurrir con más frecuencia en el infrarrojo y en el ultravioleta que en el visible.

En muchos casos prácticos los efectos de interferencia pueden de hecho ser significativos. Pueden ser evitados usando más de una líneas de absorción del gas de interés, pero esta comprensión complica el análisis y requiere un equipo mas sofisticado. Finalmente la digitalización y otros errores en el procedimiento de señales son aspectos fundamentales de cualquier medición practica, y pueden de hecho ser la fuente de error dominante fijando un límite mas bajo al alcanzable por $\Delta \ln$ en (3.38).

3.6 Interpretación del LIDAR de los valores de cuantificación del ozono(O₃) de la estratosfera

Según Cleghorn(2002:Internet), los distintos tipos de LIDAR miden diferentes propiedades atmosféricas. Esto debido a que los pulsos del láser se pueden ajustar a diferentes longitudes de onda para así fijar el objetivo, es decir el tipo de gas atmosférico o aerosol que se desea estudiar.

3.6.1 El sistema DIAL aerotransportado. De acuerdo a Browell et.al.(1998:399) y Cleghorn(2002:Internet) el sistema LIDAR de Absorción Diferencial(Differential Absorption Lidar, DIAL), se ha utilizado para medir ozono, vapor de agua y aerosoles por parte de la NASA(Centro de Investigación Langley).

Los investigadores han usado sistemas DIAL con base en tierra desde mediados de 1960, aerotransportados desde inicios de 1980 y el espacial(satelital) a finales de 1994.

Según Browell et.al.(1998:400) y Cleghorn(2002:Internet) el sistema aerotransportado UV DIAL del Centro de Investigación Langley de la NASA, es un instrumento que envía pulsos de radiación láser a diferentes longitudes de onda a la atmósfera para medir ozono y simultáneamente aerosol y nubes. Los rayos de luz son enfocados ambos hacia arriba y debajo de la aeronave.

El sistema UV DIAL usa cinco longitudes de onda láser(o LIDAR) en tres diferentes regiones del espectro electromagnético: dos en la región UV para mediciones de ozono, dos en la visión visible y una en la región cercana al infrarrojo (IR).

Las longitudes de onda infrarrojo (IR) y visible miden aerosol y nubes. Comparando estas dos longitudes de onda puede obtenerse información acerca de su distribución de aerosol. Las dos longitudes de onda UV determinan el perfil de ozono y al analizar las diferencias de absorción debidas al ozono entre los retornos de las dos longitudes de onda del LIDAR. De esta medición los científicos pueden determinar la localización y cantidad de aerosol, nubes y ozono a lo largo de la línea de vista del sistema UV DIAL.

Este sistema DIAL aerotransportado usa el láser de dye Nd:YAG bombeado para generar las longitudes de onda UV(ultravioleta) y la IR(infrarrojo) en el DIAL para las mediciones simultáneas de ozono, aerosol y nubes. Los láser originales de Nd:YAG y de dye fueron reemplazados en 1995, y el láser de Nd:YAG de diodo bombeado es el que actualmente se utiliza.

El diagrama de bloques del sistema según Browell et.al.(1998:401) se muestra en la Fig.17 y los parámetros actuales del sistema UV DIAL aparecen en la tabla 3, una separación de 10nm en la longitud de onda UV DIAL es suficientemente grande para permitir mediciones de ozono y suficientemente pequeña para reducir los errores, que provienen de la diferencia variable de la dispersión de aerosoles, resultando en mediciones con exactitud <10% o 5ppbv cualquiera de estas es pequeña para una medición de una amplitud de 15Km.

Mediciones estratosféricas en grandes amplitudes pueden resultar con errores por efectos de las señales inducidas, que al no ser corregidas pueden causar inadecuadas mediciones de ozono en el DIAL.

Tabla 3: Parámetros del sistema UV DIAL aerotransportado Langley de la NASA. Browell et.al.(1998:400).

Láser continuo modelo ND 6000 con lámpara bombada de Nd:YAG Modelo 9030 láser dye			
Frecuencia de repetición del pulso	30 Hz		
Longitud del pulso	8-12 ns		
Energía del pulso a 1.06 μ m	250-350 mJ		
a 600nm	50-70 mJ		
a 290-300nm	30 mJ		
Separación de longitud de onda para el ozono	10nm		
Dimensiones(largo x ancho x altura)	234" x 40" x 43"		
Peso	3825 libras		
Requerimientos de potencia	30 kW		
Receptor	Regiones de longitud de onda		
	289-300 nm	572-600 nm	1064 nm
Área del receptor	0.086 m ²	0.086 m ²	0.086 m ²
Eficiencia del receptor para detectar	31 %	40 %	31 %
Eficiencia del detector de cuantos	26 %	8 %	40 %
Eficiencia total de fotones recibidos	6.5 %	3.2 %	12.4 %
Campo de visión del receptor	≤ 1.5	≤ 1.5	≤ 1.5

Actualmente se encuentra en marcha la reducción de los requerimientos de la masa, volumen y potencia eléctrica del sistema UV DIAL aerotransportado, aprovechando un solo láser de diodo bombeado Nd:YAG para reemplazar los dos láser de lámparas bombeadas de Nd:YAG.

Comparando los dos sistemas actuales, el nuevo sistema requerirá únicamente 37% de la potencia(11kW), 47% del espacio del piso(110"x40", largo x ancho), y 57% del peso(2175lbs). Esta reducción de tamaño permitirá acomodar instrumentos adicionales en la aeronave DC-8 durante las misiones de campo.

El sistema UV DIAL aerotransportado Langley(de la NASA) ha hecho contribuciones significativas para el conocimiento del ozono troposférico y estratosférico. Se han efectuado 19 vuelos experimentales por la NASA en el período de 1980 a 1998(16 fueron internacionales). Estas misiones volaron en cada uno de los siete continentes.

El sistema UV DIAL generalmente vuela en el DC-8(aeronave de la NASA) transportando entre 10 y 15 instrumentos.

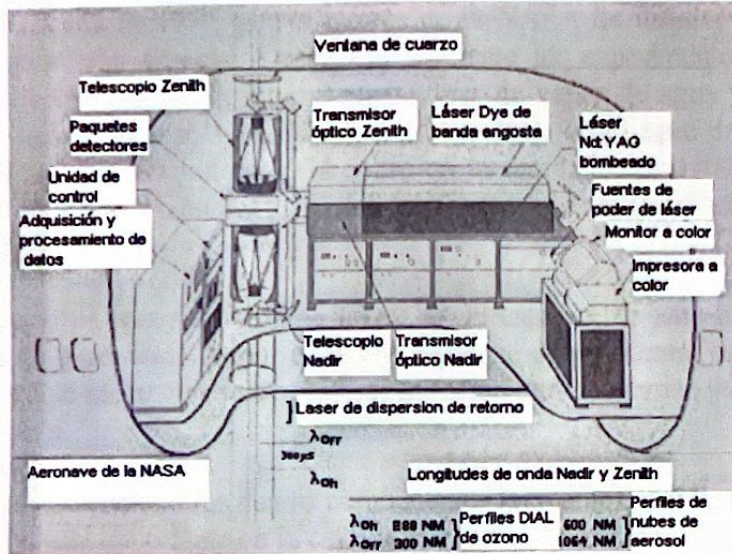


Figura 17. Diagrama de bloques de la configuración del sistema UV DIAL para operar en aeronaves. Browell et.al.(1998:401)

Las capacidades del UV DIAL aerotransportado son también beneficiosas para otras investigaciones a bordo del avión. Los científicos pueden ganar un entendimiento mayor de la química, composición y naturaleza de la atmósfera, si ellos usan el UV DIAL para ayudar otros instrumentos en lugar de usar cada instrumento de forma separada. Desde que UV-DIAL toma mediciones sobre y abajo del avión, este crea un mapa atmosférico del área circundante(Fig.18). Usando este mapa, se puede localizar otros eventos atmosféricos por ejemplo una nube de contaminantes de la quema de biomasa.

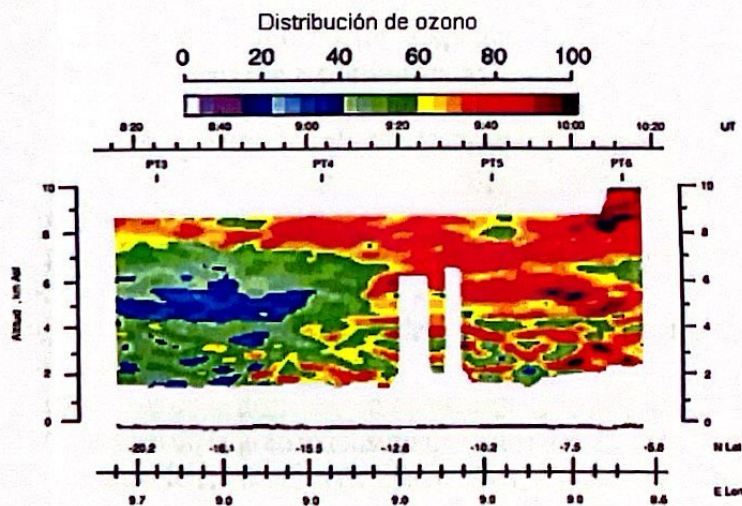


Figura 18. Ejemplo de mapa atmosférico. La imagen superior representa la distribución de ozono en el área asociada con la quema de biomasa en la parte oeste de África central. La escala de color va de rosado(baja concentración) a negro(alta concentración) indicando la concentración del ozono en la atmósfera. Las áreas blancas indican la región inaccesible para efectuar las mediciones debido a falta de datos o a causa de nubes de contaminantes. Cleghorn(2002:Internet).

3.6.2 El sistema DIAL con base en el espacio. Según Browell et.al.(1998:405) expone que los sistemas DIAL en el espacio se han discutido desde finales de la década de 1970, por el interés de la NASA de instalar sistemas LIDAR sobre un trasbordador espacial. Desde ese momento los experimentos con DIAL han sido evaluados con énfasis en futuras mediciones de vapor de agua y ozono desde el espacio. El uso se hizo más verosímil con el exitoso despliegue del primer sistema LIDAR para nubes y aerosol en 1994 sobre un trasbordador espacial, conocido como LITE (Lidar In space Technology Experiment, experimento de tecnología del LIDAR en el espacio).

La razón de poner un sistema DIAL en el espacio, es para brindar resolución vertical alta de gases tales como: ozono y vapor de agua, además de la medición de nubes y aerosol, a lo largo de la troposfera; así como también ozono y aerosol a lo largo de la estratosfera.

Como se mencionó los cuatro componentes (aerosoles, nubes, ozono y vapor de agua) juegan un rol importante en la cantidad de radiación hacia el planeta Tierra y en la química atmosférica.

Un sistema DIAL con base espacial es capaz de efectuar mediciones remotas, la mayoría sobre regiones inaccesibles, así como también en regiones donde los perfiles de medición son rutinariamente hechos con el propósito de comparación.

El LITE fue instalado a bordo del trasbordador espacial Discovery, del 10 al 20 de septiembre en 1994 y demostró la utilidad del funcionamiento del LITE en el espacio.

El LITE recopiló 53 horas de datos durante la misión de 10 días, permitiendo un mejor conocimiento de la estratosfera y troposfera. El LITE fue diseñado inicialmente como una tecnología de demostración experimental, las contribuciones científicas significativas del LITE aparecen a continuación:

- Mediciones de perfiles verticales de nubes, incluyendo la observación de la ocurrencia de múltiples capas de nubes e inter comparación con la altura recuperable de las nubes del satélite pasivo.
- Información detallada en áreas urbanas e industriales de nubes de contaminantes (emisión y transporte de azufre).
- Observaciones de la estructura de las nubes del Sahara al propagarse a través del océano Atlántico.
- Observaciones de la distribución de aerosol en la estratosfera.
- Observaciones de la gran extensión de biomasa quemada en el hemisferio sur.
- Recuperación de los perfiles de temperatura de la estratosfera.
- Observaciones de aerosoles a altas altitudes de la troposfera en el hemisferio sur.
- Observaciones de múltiples dispersiones en los datos del LITE en la frontera de la capa planetaria.

El desarrollo del sistema DIAL de ozono con base en el espacio, se resume por los parámetros del sistema y los objetivos de desempeño como se muestra en la Tabla 4.

Tabla 4: Parámetros del sistema y objetivos de desempeño para un sistema satelital DIAL de ozono. Browell et.al.(1998:406).

Característica	Objetivo de desempeño
Transmisor láser	
Longitud de onda/nm	308/320(prendido/apagado)
Energía del pulso/mJ	500(cada longitud de onda)
Frecuencia de repetición de par de pulsos/Hz	10(pares de pulsos de prendido y apagado)
Receptor	
Area/m ²	3.0(2.0m de diametro)
Campo de visión/mrad	0.3
Ancho de banda de filtro FWHM/nm	0.5
Eficiencia óptica generalmente/%	40
Eficiencia de detector cuántico/%	31
Funcionamiento del sistema	
Resolución de mediciones y exactitud de objetivos alcanzados para el ozono	
Troposfera	
Noche	<2.5Km x 200Km(10%)
Día	<3.0Km x 300Km(10%)
Estratosfera	<1Km x 100Km(10%)

3.7 Capacidades de monitoreo remoto de los sistemas de láser

Según Hinkley(1976:22) el monitoreo remoto se puede definir como detección cuantitativa y/o cualitativa de un parámetro químico o físico en el ambiente donde el instrumento de monitoreo y el parámetro bajo investigación espacial se separan. En la atmósfera, las técnicas de la detección remota se pueden dividir en dos amplias categorías: activa y pasiva, y que dependen de la fuente de la radiación. Las técnicas pasivas hacen uso de la radiación disponible en la atmósfera (radiación solar y tierra-reflejada o emitida). La interacción de esta radiación con la especie bajo investigación (absorción y dispersión) o emisión termal de la especie se observa para la interconcentración.

Las técnicas activas, por otra parte, son caracterizadas por la introducción de la radiación específica en la atmósfera, incorporando típicamente los láser como la fuente de esta radiación. La interacción (que dispersa, absorción, fluorescencia) con la atmósfera se observa para deducir la concentración de la especie. La discusión restante de la sección será limitada a las técnicas activas que utilizan los láser como la fuente de radiación (láser se puede también utilizar en el modo pasivo como osciladores locales para detectar la radiación por técnicas de alta resolución, sensibles del heterodino). Las técnicas activas, con el fin de esta discusión, serán subdivididas más a fondo en sistemas de uno y de dos extremos.

LIDAR es un acrónimo de rango de detección de luz. Todos los sistemas de LIDAR de un extremo consisten en un láser y un telescopio con ejes ópticos alineados y paralelos tal que el campo visual del telescopio incluye el rayo láser mientras se propaga a través de la atmósfera. Las diferencias en los sistemas de LIDAR mencionados anteriormente están en la selección de la longitud de onda del láser, de la longitud de onda del receptor y del análisis y de la interpretación de datos. En el sistema más básico, designado simplemente LIDAR, la longitud de onda del detector se empareja a la longitud de onda del láser. Mientras que la radiación de láser se propaga a través de la atmósfera, interactúa con aerosoles y moléculas. El principio de interacción de interés es dispersión elástica por los aerosoles. Algo de lo dispersado es recogido por el telescopio y detectado por medio de un foto multiplicador sensible. La señal detectada se registra en función del tiempo para proporcionar una medida gama resuelta de dispersión atmosférica. El análisis de los datos registrados entonces se realiza para proporcionar un índice de la distribución del aerosol en la troposfera y la estratosfera.

3.7.1 Sistemas de un extremo. Los sistemas de un extremo, como el nombre lo indica, co-localizan la fuente del láser y el telescopio receptor. Los sistemas generalmente de un extremo dependen de la dispersión como los medios primarios para interrogar a la atmósfera. Esto puede dispersar por la especie de interés o por otros componentes atmosféricos, con la especie de interés modificando la transmisión del rayo láser en la manera medible.

Las técnicas directas de dispersión incluyen LIDAR de los siguientes tipos:

- LIDAR Raman
- LIDAR de resonancia

Y los que utilizan técnicas indirectas son:

- LIDAR de dispersión de absorción diferencial
- LIDAR Raman para la visibilidad

Cada uno de estas técnicas será discutida por separado a continuación.

- **LIDAR Raman.** De acuerdo a Hinkley(1976:22) en el LIDAR Raman el receptor se hace sensible, con el uso de un espectrómetro o de un filtro de interferencia, a las longitudes de onda Raman-cambiadas de puesto. La mayoría de las moléculas dispersan la radiación electromagnética no solamente en la longitud de onda de la excitación sino también en las longitudes de onda cambiadas de posición específicas por el fenómeno designado la dispersión de Raman. La magnitud del cambio es única para la molécula de dispersión y la intensidad de la banda de Raman es proporcional a la concentración de las moléculas de la dispersión. El LIDAR Raman se aplica a la medición de varias moléculas atmosféricas, incluyendo H₂O, SO₂ y el CO₂. La limitación más significativa de la técnica se presenta en la baja sección transversal de la dispersión Raman. Así, la aplicación requiere el uso de láser de alta potencia, grandes telescopios, tiempos de integración largos y se limita generalmente a las medidas donde están presentes las altas concentraciones moleculares.

- **LIDAR de resonancia.** El LIDAR de resonancia se caracteriza por una selección cuidadosa del láser y de la longitud de onda del receptor para emparejarlos a una longitud de onda de la absorción de la especie atmosférica de interés.

Estimular una molécula en una frecuencia de la absorción produce la dispersión resonante que puede estar considerablemente más intensa que la dispersión no-resonante. La utilidad de la resonancia LIDAR se limita en la atmósfera más baja, porque al eliminar la radiación baja se reduce la intensidad de la dispersión. Sin embargo, esta técnica se ha aplicado con éxito a la medida de la concentración de sodio y de potasio atómicos.

- **LIDAR de dispersión de absorción diferencial.** Este sistema se basa en técnicas indirectas de dispersión. Este depende de la dispersión por los aerosoles en la atmósfera. Y las mediciones seleccionan las especies moleculares debido a su absorción. La técnica hace uso de por lo menos dos rayos láser en diversas longitudes de onda que se transmitan secuencialmente o simultáneamente a lo largo de la misma trayectoria en la atmósfera. Un rayo láser es absorbido por la especie molecular de interés, mientras que el otro en una longitud de onda próxima no se absorbe fuertemente.

Puesto que los rayos están separados espectralmente por un incremento pequeño de la longitud de onda, la sección representativa para la dispersión del aerosol puede ser esencialmente idéntica para cada uno. Hasta el punto de que sea válido, la diferencia en la intensidad dispersada de los rayos como se propaga es debido a la diferencia en la absorción por la molécula bajo investigación. El análisis de las señales detectadas de ambos rayos en función del tiempo proporciona una medida de rango resuelto de la concentración de moléculas de absorción.

- **LIDAR Raman para la visibilidad:** El LIDAR Raman, según lo descrito anteriormente, puede también ser aplicado a la medición de la atenuación atmosférica. En esta aplicación señales Raman de N_2 u O_2 en la atmósfera son monitoreadas. Puesto que la distribución de estos componentes importantes es bien conocida, una comparación de la señal de Raman, con la distribución molecular conocida proporciona una medida rango-resuelto de atenuación de la doble-trayectoria. En muchos casos especialmente de baja visibilidad, la atenuación se puede relacionar con la visibilidad.

3.7.2 Sistemas de dos extremos. Según Hinkley(1976:24) los sistemas de dos extremos se caracterizan por tener el transmisor láser y telescopio receptor localizados por separado o teniendo el láser y el telescopio co-localizados con un reflector físico situado en una distancia. Los sistemas son de:

- LIDAR biestático
- LIDAR de absorción de trayectoria larga.
- **LIDAR biestático.** El LIDAR biestático es similar al sistema de LIDAR discutido anteriormente cuenta con que el láser y el telescopio estén separados por una distancia. En la utilización de esta técnica, ambos el láser y el telescopio están dirigidos hacia el mismo punto en la atmósfera. La divergencia del rayo láser y del campo visual del telescopio juntos definen el volumen de dispersión en el punto de intersección.

A medida que el pulso del láser se propaga a través del volumen de la dispersión, algo de la energía dispersada elásticamente por los aerosoles atmosféricos es recogida por el telescopio y detectada por el foto multiplicador. La salida del foto multiplicador se registra cuidadosamente variando el ángulo apuntado por el láser y el telescopio. Las mediciones de la dispersión a una altitud fija se pueden observar para la variedad de ángulos dispersados. La técnica biestática del LIDAR puede proporcionar datos valiosos de ángulos de dispersión que se pueden interpretar para deducir el índice de refracción y/o la distribución de tamaño de aerosoles atmosféricos.

- **Absorción de trayectoria larga.** Esta técnica utiliza la absorción de un rayo láser mientras se propaga a través de la atmósfera como el parámetro medible para deducir la concentración molecular. La fuente del láser y el receptor del telescopio se pueden separar y apuntarse entre sí; pero, para facilitar su operación, el láser y el telescopio se co-localizan generalmente con sus ejes ópticos alineados y apuntando hacia el retro-reflector o a una blanco topográfico.

Como en el LIDAR de dispersión de absorción diferencial discutido anteriormente, por lo menos dos rayos láser en longitudes de onda levemente diferentes se utilizan para explorar la atmósfera que se encuentra entre el sistema y el reflector. Los dos rayos se ajustan en longitud de onda para ser de encendido y apagado en la banda de absorción de la molécula bajo investigación. La comparación de las dos señales recogida por el telescopio proporciona una medida de la concentración integrada de la especie molecular a lo largo de la trayectoria de transmisión. En algunos usos de la técnica, más de dos rayos de longitud de onda diferente se requieren debido a la absorción molecular múltiple. El número de los rayos requeridos es por lo menos uno más que el número de los amortiguadores moleculares significativos.

Una consecuencia prometedora de esta técnica es el uso de blancos topográficos en vez de los retro-reflectores cooperativos. Las blancos pueden ser árboles, colinas o edificios al usar un sistema terrestre horizontal, o la superficie terrestre para un sistema aerotransportado.

IV. METODOLOGÍA DE INVESTIGACIÓN

Cuando se planificó este proyecto de investigación se consideró la metodología a seguir que consistió en consultar la bibliografía y otras fuentes de Información con respecto al tema en estudio. Fue necesario realizar la visita a Universidades, Instituciones y Centros de investigación para conocer los estudios realizados afines al tema específico en estudio.

Las fuentes de información fueron las siguientes:

Biblioteca de la Universidad del Valle de Guatemala.
Biblioteca de la Facultad de Ingeniería de la USAC.
Biblioteca Central de la Universidad de San Carlos
Biblioteca de la Universidad Rafael Landívar, Guatemala.
Centro de documentación del INSIVUMEH, Guatemala.
Biblioteca de Texas Lutheran University. Seguin Texas. USA.
Biblioteca de la Universidad de Texas, Austin Texas. USA.
Biblioteca de la Universidad de Texas State, San Marcos Texas. USA.

Comunicación personal con investigadores:

Jefe del Departamento de Física de Texas Lutheran University
Professor Paul O'Scheie.

Visita a centros de investigación:

Centro de investigación de New México. USA.
Museo del espacio de la NASA., en Houston. USA.

V. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

De acuerdo a la investigación efectuada en las diferentes fuentes de información se presenta los resultados de la utilización de la técnica UV-DIAL (LIDAR de Absorción Diferencial Ultra Violeta), para determinar valores de la presencia de ozono O_3 en la estratosfera.

Los sistemas LIDAR han seguido un proceso de evolución desde los que tienen base en tierra, luego los de aire y finalmente los del espacio.

Los sistemas LIDAR con base en tierra aparecieron alrededor de 1960, seguidos más tarde por los aerotransportados que aparecen entre 1970 y 1980. Durante esta década en 1978 apareció el DIAL aerotransportado que incorpora el espectrómetro con láser de absorción para la medición de ozono troposférico, y en 1980 el centro de investigación Langley operó el primer sistema de medición UV DIAL para medir el perfil de ozono.

El desarrollo exitoso del LIDAR en la tecnología espacial conocido como LITE(Experimento de Tecnología del LIDAR en el espacio, Lidar In space Technology Experiment); en septiembre de 1994 demostró que los LIDAR con base espacial recopilan información valiosa de la atmósfera global. Gran parte de las contribuciones en la medición de ozono y vapor de agua desde sistemas aéreos y espaciales los ha ejecutado el Centro de Investigación Langley de la NASA.

El sistema LIDAR de Absorción Diferencial(DIAL) ha sido utilizado para medir ozono, vapor de agua y aerosoles transportado en sistemas aéreos(desde 1980) permitiendo nuevos descubrimientos en la química atmosférica, composición y dinámica lo que permite cuantificar fenómenos climáticos en experimentos en gran escala en todo el mundo.

El sistema DIAL aerotransportado, ha proveído una abundancia de información acerca de la química y dinámica de la atmósfera durante los últimos 23 años. Asimismo con el desarrollo y despliegue del sistema DIAL aerotransportado, se brindó una base importante para el desarrollo de los diseños de sistemas DIAL con base en el espacio. De los que existe una gran cantidad de sistemas DIAL aerotransportados, pero nuestro estudio se limitó al sistema de medición de ozono del DIAL aerotransportado del Centro de Investigación Lagley de la NASA.

El sistema UV DIAL aerotransportado de la NASA(Langley) usa el láser de dye Nd:YAG bombeado para generar las longitudes de onda UV(ultravioleta) y la IR(infrarrojo) en el DIAL para las mediciones simultáneas de ozono, aerosol y nubes. Los láser originales de Nd:YAG y de dye fueron reemplazados en 1995 y el láser de Nd:YAG de diodo bombeado es el que actualmente se utiliza.

El sistema aerotransportado UV DIAL de Langley, es un instrumento que envía pulsos de radiación láser a diferentes longitudes de onda a la atmósfera para medir ozono simultáneamente aerosol y nubes.

Los rayos de luz son enfocados ambos hacia arriba y debajo de la aeronave, permitiendo cuantificar para así crear un mapa atmosférico del área circundante. En el mapa atmosférico la concentración del ozono en la atmósfera se indica en la escala colorimétrica el color rosado baja concentración y el negro alta concentración(Fig.18).

El sistema usa cinco longitudes de onda láser en tres diferentes regiones del espectro electromagnético: dos en la región UV para mediciones de ozono, dos en la visión visible y una en la región cercana al infrarrojo(IR).

Las dos longitudes de onda UV determinan el perfil de ozono, por diferencias de absorción debidas al ozono entre los retornos de las dos longitudes de onda del LIDAR. De esta medición se puede determinar la localización y cantidad de aerosol, nubes y ozono a lo largo de la línea de vista del sistema UV DIAL(los parámetros actuales del sistema UV DIAL aerotransportado se muestran en la tabla 3).

El sistema UV DIAL aerotransportado Langley ha hecho contribuciones significativas para el conocimiento del ozono troposferico y estratosferico. Se han efectuado 19 vuelos experimentales por la NASA en el período de 1980 a 1998 (16 fueron internacionales). Estas misiones volaron en cada uno de los siete continentes.

El sistema UV DIAL generalmente vuela en el DC-8(aeronave de la NASA) transportando entre 10 y 15 instrumentos. Una pequeña muestra de las contribuciones hechas por el sistema UV DIAL aerotransportado se muestran en la siguiente tabla 5.

Tabla 5: Contribuciones significativas del sistema UV DIAL aerotransportado, para el conocimiento de la troposfera y estratosfera

Mediciones
Troposfera
Caracterización de la masa de aire
Nubes de quema de biomasa
Nubes de contaminación continental
Efectos de quema de biomasa en la producción de ozono
Estratosfera
Explicación química del comportamiento del ozono en la Antártica
Inter comparación de ozono
Mediciones sobre la Antártica
Caracterización de la nube de partículas en la estratosfera polar
Reducción del ozono en el deposito de la estratosfera tropical después de la erupción del volcán Pinatubo(Lozón, Filipinas)
Inter comparación entre los instrumentos con base en tierra y espacial

En muchas ocasiones las mediciones de UV DIAL se combinan con las mediciones que hacen otros instrumentos, situados en aeronaves o en satélites, lo que da como resultado un conocimiento más amplio de la química, composición y dinámica de la atmósfera; que al utilizar únicamente un instrumento.

Una gran cantidad de resultados puede obtenerse de un sistema espacial DIAL de ozono. Esto incluye consecuencias relacionadas con el ozono como producción y destrucción fotoquímica del ozono y transporte en la troposfera, localizado en la tropopausa, disminución y dinámica del ozono estratosférico.

Aunque en el satélite existan gran cantidad de instrumentos (pasivos y activos) para medir ozono estratosférico cada uno tiene diferente conjunto de parámetros de medición. Pero un sistema DIAL para ozono es capaz de proveer un perfil de alta resolución en las mediciones en regiones en ocasiones no cubiertas por instrumentos pasivos.

Un sistema DIAL de ozono con base en el espacio es capaz de hacer mediciones de ozono a través de la troposfera, las cuales permiten un mejor conocimiento de la producción y transporte del ozono troposférico en regiones remotas. Un sistema DIAL de ozono con base en el espacio optimiza las mediciones del ozono troposférico, también permite mediciones de alta resolución en la estratosfera (1Km en vertical y 100Km en horizontal), junto con la alta resolución de las mediciones de aerosoles (100 m vertical y 10Km horizontal) para estudiar la dinámica de la estratosfera y química del ozono.

Al combinarse los datos de ozono y aerosol de instrumentos de satélite pasivos, las mediciones desde un sistema DIAL de ozono con base en el espacio permiten una mayor caracterización de la distribución vertical del ozono en la troposfera y estratosfera alrededor del globo terráqueo. Este tipo de mediciones por medio del DIAL es útil en detectar errores sistemáticos en mediciones efectuadas por sensores remotos pasivos y en mejorar los algoritmos de procesamiento de datos.

El sistema DIAL ubicado Langley como en otras ubicaciones ha demostrado las ventajas de las plataformas móviles y muchas contribuciones importantes para el conocimiento de la química de la atmósfera, dinámica, meteorológica y proceso de radiación que se ha efectuado. Mientras el despliegue de los sistemas DIAL aerotransportados continua, el uso de plataformas aerotransportadas no provee la cobertura espacial y temporal que se desea o que puede ser brindada por una plataforma espacial.

El éxito de la implementación del LITE en septiembre de 1994 demostró, que los sistemas LIDAR con base en el espacio pueden brindar información global de la atmósfera de la Tierra. Progresando de forma significativa en el desarrollo del sistema en identificar los requerimientos, permitiendo implementar la tecnología necesaria para los sistemas DIAL con base en el espacio. Contribuyendo de esta manera a la cuantificación y análisis de los niveles de polución, para investigación de la química de la atmósfera de la Tierra.

La discusión se limita a las técnicas activas que utilizan los láser como fuente de radiación también se pueden utilizar en el modo pasivo como osciladores locales para detectar la radiación por técnicas de alta resolución. Las técnicas activas son subdivididas en sistemas de uno y de dos extremos.

Los sistemas de LIDAR de un extremo consisten en un láser y un telescopio con ejes ópticos alineados y paralelos tal que el campo visual del telescopio incluye el rayo láser mientras se propaga a través de la atmósfera. Las diferencias en los sistemas de LIDAR están en la selección de la longitud de onda del láser, de la longitud de onda del receptor y del análisis de datos. En el sistema designado LIDAR, la longitud de onda del detector se empareja a la longitud de onda del láser, la radiación se propaga a través de atmósfera que interactúa con la especie de interés o con otros componentes atmosféricos (aerosoles y moléculas) modificando la transmisión del rayo láser cuantificable; la interacción es dispersión elástica por los aerosoles.

La señal se registra en función del tiempo para proporcionar una medida gama resuelta de dispersión atmosférica. El análisis de los datos brinda un índice de la distribución del aerosol en la troposfera y la estratosfera.

Es conveniente mencionar las técnicas de dispersión directa e indirecta que incluyen LIDAR:

Tabla 6: Técnicas de dispersión del LIDAR

Técnicas de dispersión	
Directas	Indirectas
LIDAR Raman	LIDAR de dispersión de absorción diferencial
LIDAR de resonancia	LIDAR Raman para la visibilidad

El LIDAR Raman, es aplicable al tener presentes altas concentraciones moleculares. Esto debido a la baja sección transversal de la dispersión Raman. Requiriendo la técnica el uso de láser de alta potencia, grandes telescopios y tiempos de integración largos.

El LIDAR de resonancia, se basa en estimular la molécula en una frecuencia de absorción para producir la dispersión resonante. Su uso se limita a la atmósfera más baja porque al eliminar la radiación baja se reduce la intensidad de dispersión.

El LIDAR de dispersión de absorción diferencial depende de la dispersión por los aerosoles en la atmósfera, las mediciones seleccionan las moléculas debido a su absorción. La técnica hace uso de dos rayos láser en diversas longitudes de onda que se transmitan simultáneamente a lo largo de la misma trayectoria en la atmósfera. La diferencia en la intensidad dispersada de los rayos como se propaga es debido a la diferencia en la absorción por la molécula en estudio. Las señales detectadas en ambos rayos en función del tiempo proporcionan una medida de rango de la concentración de moléculas de absorción.

El LIDAR Raman para la visibilidad puede ser aplicado a la medición de la atenuación atmosférica. Una comparación de la señal Raman que incluye la atenuación con la distribución molecular conocida como una medida rango de doble trayectoria.

Los sistemas de LIDAR de dos extremos se caracterizan por tener el transmisor láser y telescopio receptor separados o teniendo el láser y el telescopio co-localizados con un reflector físico.

El LIDAR biestático cuenta con que el láser y el telescopio estén separados por una distancia, la utilización de esta técnica el láser y el telescopio están dirigidos hacia el mismo punto en la atmósfera. La divergencia del rayo láser y del campo visual del telescopio definen el volumen de dispersión en el punto de intersección.

En la técnica biestática el LIDAR proporciona datos valiosos de ángulos de dispersión para deducir el índice de refracción y o la distribución de tamaño de aerosoles atmosféricos.

La técnica de absorción de trayectoria larga utiliza la absorción de un rayo láser mientras se propaga a través de la atmósfera como el parámetro cuantificable para deducir la concentración molecular. La fuente del láser y el receptor del telescopio se pueden separar y apuntarse entre con sus ejes ópticos alineados y apuntando hacia el retro-reflector o a un blanco topográfico.

Los dos rayos se ajustan en longitud de onda para ser encendido y apagado en la banda de absorción de la molécula en estudio. La comparación de las dos señales recogida por el telescopio proporciona medida de la concentración a lo largo de la trayectoria de transmisión. El resultado prometedor de esta técnica es el uso de blancos topográficos que pueden ser árboles, colinas o edificios al usar un sistema terrestre horizontal para un sistema aerotransportado.

VI. CONCLUSIONES

De acuerdo al planteamiento de la problemática en la cuantificación de la cantidad de ozono en la estratosfera y en base al estudio efectuado se puede llegar a concluir de acuerdo a los objetivos planteados lo siguiente:

- A. La técnica del LIDAR de absorción diferencial puede utilizarse para cuantificar una amplia gama de componentes gaseosos atmosféricos específicos con sensibilidad para mediciones.
- B. La técnica puede ser usada para obtener una trayectoria integrada de concentración de especies gaseosas al medir la señal desde un objetivo remoto fijo.
- C. Las concentraciones mínimas indican que la técnica de absorción diferencial puede utilizarse para medir la concentración de varios gases atmosféricos a niveles de ambiente urbano en regiones en las cuales están separadas por varios kilómetros del LIDAR detector.
- D. Para cuantificar ozono O_3 así como también aerosol, es posible utilizar un LIDAR de absorción diferencial ultra violeta(UV DIAL) aerotransportado o espacial(satelital).
- E. Las dos longitudes de onda UV, determinan el perfil de ozono por diferencias de absorción debidas al ozono entre los retornos de las dos longitudes de onda del LIDAR, pueden determinar la localización y cantidad de aerosol, nubes y ozono a lo largo de la línea de vista del UV DIAL.
- F. El sistema UV DIAL permite estudiar el ozono en la troposfera y en la estratosfera.
- G. Las diferencias en los sistemas de LIDAR están en la selección de la longitud de onda del láser, de la longitud de onda del receptor y del análisis de datos.

VII. RECOMENDACIONES

Se sugiere la adopción de la técnica del LIDAR de absorción diferencial UV, para cuantificar el ozono O_3 y componentes gaseosos atmosféricos específicos para conocer el nivel de polución.

Se sugiere la utilización del LIDAR de absorción diferencial ultra violeta aerotransportado y espacial para cuantificar ozono O_3 así también aerosol en la troposfera de Guatemala para conocer los gradientes durante periodos de tiempo específicos para conocer los efectos de la polución.

El método en mención es posible utilizarlo con fines de investigación meteorológica para Guatemala. Dado el equipo que se necesita, a través de convenios de cooperación regional con el o los países que tienen implementado el LIDAR de absorción diferencial ultra violeta.

Capacitar personal necesario para ejecución e interpretación de la técnica del LIDAR de absorción diferencial UV de las instituciones u otras dedicadas al estudio de los fenómenos meteorológicos y de vulcanología para las condiciones de Guatemala.

VIII. BIBLIOGRAFÍA

1. Anderson, J. 1976. Gasdynamics Lasers An Introduction. Academic Press New York U.S. 161pp.
2. Anonymous. 1999. Jul. Contract awarded for ozone instrument for satellite system of the future. Bulletin of the American Meteorological Society. 80(7):1448-1449.
3. Anonymous. 1999 Aug. Climate-change watch:Recent findings. National Wildlife.37(5):10.
4. Anonymous. 1996.Sep 21. Bouncing off air. Economist. 340(1984):54-85.
5. Anonymous. 1999. Apr. Laser tagging to ease construction site management. Civil Engineering. 69(4):29.
6. Anonymous. 1999. Aug. POAM III provides new altitude observations. Bulletin of the American Meteorological Society. 80(8):1731.
7. Anonymous. 1999. Oct. Polar snow reveals secrets of ozone-depleting gases. Bulletin of the American Meteorological Society. 80(10):2117-2118.
8. Anonymous. Capa de ozono se deteriora. Prensa Libre, Mayo 4,2000.
9. Arieli, R.2002. The Laser Adventure.
<http://stwi.weizmann.ac.il/Lasers/laserweb/index.htm> Weizmann Institute of Science, Rehovot, Israel.
10. Banta, Robert M. Darby, Lisa S., Kaufmann, Pirmin, Levinson, David H. zhu, Cui-Juan. 1999. Aug. Wind-flow patterns in the Grand Canyon as revealed by Doppler LIDAR. Journal of Applied Meteorology.38(8):1069-1083.
11. Browell E. V., S. Ismail y W.B.Grant.1998.<<Differential absorption lidar(DIAL) measurements from air and space>>. Journal Applied Physics B67(4):399-410.
12. Browell, E.V. et.al. 1993.<< Ozone an aerosol changes during the 1991-1992. Airborne Artic Stratospheric Expedition>>. Journal Science. 261(5125):1155-1158.
13. Chang, R.1992. Química.4a.ed. Editorial McGraw-Hill 1064pp.
14. Chu, B. 1974. Laser Light Scattering. Academic Press New York. U.S. 300pp.
15. Cleghorn, C.2002. Airborne UV Differential Absorption Lidar(DIAL):Measuring Ozone and Aerosols in Atmosphere.
<http://oea.larc.nasa.gov/PAIS/DIAL.html>
16. Clinton, William J. 1999 Sep.20 Message to the Senate transmitting the Montreal Protocol on Substances the Deplete the Ozone Layer. Weekly Compilation of Presidential Documents. 35(37):1759.
17. Contreras, J. 1987. Espectroscopía Raman y Estructura Molecular. Proyecto PNUD UNESCO. UNESCO Press. 236pp.
18. Craig, R.1968. "The Edge of Space: Exploring the Upper Atmosphere" Garden City, N.Y. Doubleday. 147pp.
19. Da Silva L. 1997.Agujero de Ozono sobre Suramérica. Consulta del Departamento de Física y el Centro de Investigaciones de Energías Renovables y Ambientales (CIERA) de la Universidad Técnica Federico Santa María, Valparaíso, Chile.
<http://ozono.dcsc.utfsm.cl/info.html.2003>.

20. Espasa, C. 2002. Diccionario Enciclopedico. Madrid, España. 1799pp.
21. Hinkley, E. 1976. Laser Monitoring of the Atmosphere. Springer-Verlag Berlin Germany. 353pp.
22. Measures, R. 1984. Laser Remote Sensing. New York, U.S.A. 461pp.
23. Miller, G., 1994. Ecología y Medio Ambiente. Grupo Editorial Iberoamerica. México D.F. 783pp.
24. Odum, Eugene. 1978. Ecología. Cia. Editorial Continental.S.A. México D.F. 277pp.
25. O'Shea, Donald; W. Russell y William Rhodes. 1978. Introduction to Lasers and Their Applications. Addison-Wesley Publishing Company. New York. U.S.A. 270pp.
26. Phillips S. 1995. Earth's Atmosphere.
<http://liftoff.msfc.nasa.gov/academy/space/atmosphere.html>.
27. Proctor, P. 1996. <<Compact Lidars Search for Air Pollution>>. Journal Aviation Week & Space Technology. 145(13):59-60.
28. Somerville, R. 1996. The Forgiving Air: Understanding Environmental Change. Berkeley University of California Press. 161pp.
29. Stanford, Cancer Center. 2002.
<http://cancer.stanfordhospital.com/index.html>
30. World Meteorological Organization, Scientific Assessment of Ozone Depletion: 1994, WMO Global Ozone Research and Monitoring Project – Report No.37, Geneva, 1995.

