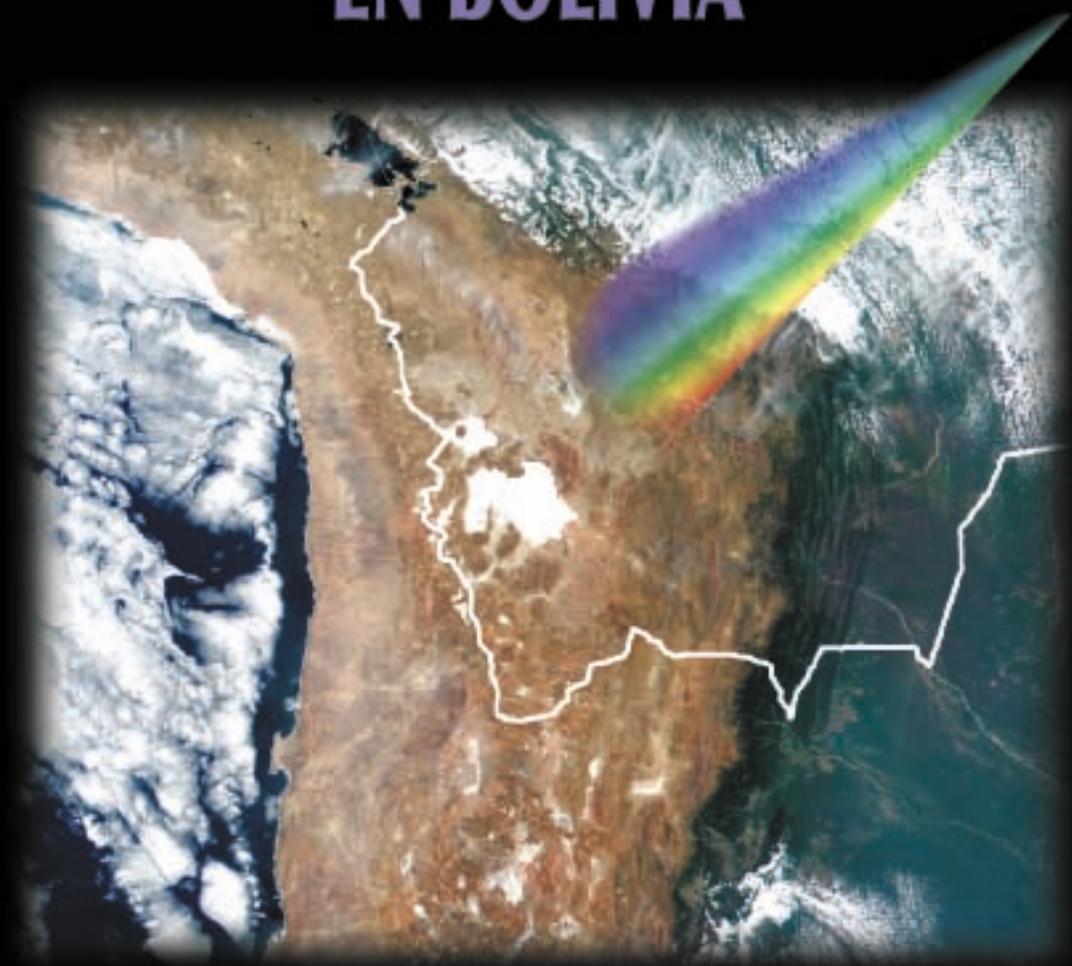




LA RADIACIÓN ULTRAVIOLETA EN BOLIVIA



FRANCESCO ZARATTI SACCHETTI (Ed.)
RICARDO FORNO GISBERT (Ed.)



LFA - UMSA

ORGANIZACIÓN PANAMERICANA DE LA SALUD
(OPS/OMS)

LABORATORIO DE FÍSICA DE LA ATMÓSFERA
(IIF - UMSA)

LA RADIACIÓN ULTRAVIOLETA EN BOLIVIA

EDITORES:

Francesco Zaratti Sacchetti

Ricardo Forno Gisbert

CONTRIBUCIONES DE:

Marcos F. Andrade F.; Javier Cacho G.; Francesco Zaratti S.; Felix Rollano G.; Héctor Guillén T.; Virginia Villafaña y Walter Helbling; Eduardo Palenque V.; Ricardo Forno G.; Luis A. Blacutt B.; Javier A. Suárez I. y Flavio Ghezzi M.

LA PAZ - BOLIVIA
2003

LA RADIACIÓN ULTRAVIOLETA EN BOLIVIA

© Francesco Zaratti Sacchetti

© Ricardo Forno Gisbert

Primera edición: marzo, 2003

Depósito legal: 4-1-322-03

ISBN: 99905-0-338-9

Diseño e impresión: CREATIVA 2488588

Foto tapa: Proyecto MODIS (NASA)

Impreso en Bolivia

Índice

PRÓLOGO

Dr. José Antonio Pagés

INTRODUCCIÓN

Los editores

PARTE A: ASPECTOS FÍSICOS DE LA ATMÓSFERA

1. LA ATMÓSFERA

Marcos Andrade

- 1.1. Composición de la atmósfera3
- 1.2. División de la atmósfera8
- 1.3. Origen de la atmósfera terrestre11

2. LA CAPA DE OZONO Y EL AGUJERO ANTÁRTICO

Javier Cacho

- 2.1. Un gas vital15
- 2.2. Génesis de su descubrimiento16
- 2.3. La contaminación no respeta fronteras17
- 2.4. La temperatura, clave del fenómeno18
- 2.5. Una recuperación que no acaba de llegar23
- 2.6. Previsiones optimistas, pero lejanas25

3. EL OZONO EN BOLIVIA

Francesco Zaratti

- 3.1. Ozonosondeos27
- 3.2. Medidas de ozono en el Altiplano Boliviano28
- 3.3. La anomalía del ozono en el Altiplano32

4. LA RADIACIÓN ULTRAVIOLETA SOLAR

Francesco Zaratti

- 4.1. Energía y radiación37
- 4.2. Luz y colores38
- 4.3. Radiación invisible41
- 4.4. El espectro electromagnético del Sol y la constante solar42
- 4.5. ¿De qué depende la radiación ultravioleta en la Tierra?45
- 4.6. La RUV en Bolivia: valores y tendencias52

PARTE B: EFECTOS DE LA RADIACIÓN ULTRAVIOLETA

5 LA RADIACIÓN ULTRAVIOLETA Y LA PIEL

Félix Rollano

5.1. Introducción	57
5.2. Efectos negativos de la radiación solar sobre la piel	61
5.3. Fotoenvejecimiento	62
5.4. Reacciones fotoalérgicas y fototóxicas	63
5.5. Fotodermatosis	63
5.6. Conclusiones	75

6 LA RADIACIÓN ULTRAVIOLETA Y EL OJO HUMANO

Héctor Guillén

6.1. Sensibilidad	79
6.2. Tipos de daño	80
6.3. Factores de riesgo	83
6.4. Prevención	84

7 RADIACIÓN ULTRAVIOLETA SOLAR EN EL LAGO TITICACA, BOLIVIA: EFECTOS Y ADAPTACIONES DE LOS ORGANISMOS PLANCTÓNICOS

Virginia Villafañe y Walter Helbling

7.1. Introducción	85
7.2. Penetración de la radiación en la columna de agua	87
7.3. Efectos de la radiación solar en el fitoplancton	88
7.4. Efectos de la RUV en el zooplancton: El caso de <i>Boeckella titicacae</i>	90
7.5. Sensibilidad a la RUV de los organismos planctónicos del Lago Titicaca	93
7.6. Conclusiones y futuras investigaciones	94

8 LOS EFECTOS DE LA RUV SOLAR SOBRE PLANTAS Y MATERIALES DE USO TECNOLÓGICO

Eduardo Palenque

8.1. Introducción	99
8.2. Antecedentes	100
8.3. Los modelos	101
8.4. Resultados	104

PARTE C: ASPECTOS SOCIALES Y LEGALES

9 FOTOPROTECCIÓN SOLAR

Ricardo Forno

9.1. Introducción	111
9.2. Fotoprotectores artificiales	111
9.3. Factores de protección solar (FPS)	118
9.4. Bronceadores	119
9.5. Camas y lámparas bronceadoras	119
9.6. Recomendaciones generales en fotoprotección	120

10 EL ÍNDICE ULTRAVIOLETA (IUV)

Luis A. Blacutt

10.1. El índice de la RUV: un parámetro para la población	123
10.2. La campaña de la radiación ultravioleta en Bolivia	127
10.3. Los sectores más vulnerables	133
10.4. Hacia un cambio de hábitos	134
10.5. Productos y logros de la campaña	134
10.6. Lo que queda por hacer	138

11 EL PROTOCOLO DE MONTREAL RELATIVO A LAS SUSTANCIAS AGOTADORAS DEL OZONO (SAO) EN BOLIVIA

Alex Suárez

11.1. Los protocolos internacionales	141
11.2. La Ley del Medio Ambiente 1333 y su reglamentación	143
11.3. Bolivia y los tratados internacionales sobre la capa de ozono	143
11.4. Conclusiones	148

APÉNDICES:

Flavio Ghezzi

A-1. Preguntas y respuestas más frecuentes	149
A-2. Glosario	157
A-3. Respuestas a las preguntas de la sección A-1.2	163

Índice de láminas

I	Composición de la atmosfera	5
II	División de la atmosfera	9
III	Camino seguido por los CFC para llegar a los polos	19
IV	Vórtice polar antártico	21
V	Instrumentos de medición de ozono y RUV en el LFA-UMSA	29
VI	Imagen en falso color de la anomalía del ozono sobre el Altiplano	33
VII	Espectro Electromagnético	39
VIII	Espectro de emisión del Sol	43
IXa	Dependencia de la radiación ultravioleta de la latitud	47
IXb	Dependencia de la radiación ultravioleta de la nubosidad	47
Xa	Penetración de la RUV en la piel	59
Xb	Erupción polimorfa solar	59
XIa	Prurigo actínico	67
XIb	Dermatitis actínica crónica	67
XIIa	Carcinoma basocelular (<i>ulcus rodens</i>)	73
XIIb	Carcinoma epidermoide	73
XIIc	Melanoma lentigo maligno	73
XIIIa	Problemas oftálmicos según la longitud de onda	81
XIIIb	Lesiones oculares debidas a la radiación ultravioleta	81
XIV	Distribución porcentual del IUUV en la ciudad de La Paz	129
XV	Imágenes de la campaña de la RUV	131
XVI	Medidas de protección	135

PRÓLOGO

La Representación OPS/OMS en Bolivia se complace en presentar esta obra de carácter eminentemente científico, que contribuye al mejor conocimiento sobre el comportamiento del ozono y la radiación ultravioleta, lo mismo que sobre los posibles riesgos a la salud derivados de la exposición, mediante mediciones hechas en Bolivia a lo largo de los últimos años.

En general la temática del ozono, la radiación ultravioleta y los riesgos ha adquirido una importancia especial considerando que la actividad del hombre está efectivamente alterando el medio físico del planeta. En efecto, hoy no solamente existe evidencia acumulada sobre los cambios globales-climáticos, sino también un extenso marco legal adoptado por la comunidad internacional para evitar mayores impactos negativos incluyendo los posibles riesgos a la salud.

Es en el marco anterior que las contribuciones científicas que se presentan en esta obra presentan un excepcional ejemplo de los resultados de las actividades de investigación de las ciencias físicas y otras naturales en Bolivia, las que son ejecutadas por el recientemente creado laboratorio de Física de la Atmósfera de la Universidad Mayor de San Andrés.

Al presentar la obra, la Representación de la OPS/OMS en Bolivia desea testimoniar también este valioso esfuerzo que avanza en el mejor conocimiento del medio ambiente, como una contribución clave para alcanzar metas de sostenibilidad.

La Paz, 16 de abril de 2003

Dr. José Antonio Pagés
Representante OPS/OMS en Bolivia

INTRODUCCIÓN

Este texto tiene un origen, un antecesor y una evolución.

El origen es la Campaña de la Radiación Ultravioleta en Bolivia que, desde el año 1998, se realiza en Bolivia bajo la coordinación del Laboratorio de Física de la Atmósfera, con la cooperación de la Representación de la OPS/OMS y, últimamente, con la colaboración del Ministerio de Salud y Previsión (Dirección de Salud Ambiental). El impacto y los resultados de la campaña nos sugirieron preparar este material escrito como apoyo y complemento de las acciones de la misma.

El antecesor es un elegante libro publicado en 1997, *Naturaleza y Efectos de la Radiación Ultravioleta y la Capa de Ozono* (R. Forno y M. Andrade, editores), en el cual se recogían las principales ponencias de un Seminario Internacional del mismo nombre realizado en La Paz el año anterior. El éxito de esta edición y su agotamiento nos impulsaron a ofrecer al público lector este nuevo trabajo.

La evolución se debe a que, desde la fecha de publicación del libro predecesor, muchas cosas han ocurrido en Bolivia en esta área de investigación. La principal es el crecimiento del Laboratorio de Física de la Atmósfera, por entonces una incipiente actividad de investigación y extensión universitaria. Actualmente el LFA-UMSA ha ampliado su campo de interés, gracias al fortalecimiento de sus recursos humanos y al mejoramiento de equipos e insumos, adquiridos gracias a la cooperación internacional y al esfuerzo de la propia Universidad Mayor de San Andrés.

Para la publicación del presente libro han coincidido la voluntad de ampliar y actualizar un tema de mucha actualidad con la experiencia acumulada en el país, la exigencia del público por un texto de consulta sobre una temática de tanta actualidad para la población boliviana y, no menos importante, la cooperación de la OPS/OMS en la fase de redacción y en la fase de publicación. A esta institución va nuestro sincero agradecimiento.

El resultado es este libro que cuenta con la contribución científica de profesionales, nacionales y extranjeros, relacionados con la actividad del LFA-UMSA. Los Editores no hemos hecho más que reunir los diferentes textos y presentarlos de manera ordenada y completa, con la colaboración de todo el personal de nuestro laboratorio.

Esperamos que este esfuerzo plural de instituciones y personas tenga la acogida de la población boliviana y en especial de profesores y estudiantes del sistema educativo secundario, a quienes hemos tenido particularmente presentes en el proceso de la elaboración del libro.

La Paz, abril de 2003

Los Editores

PARTE A

ASPECTOS FÍSICOS DE LA ATMÓSFERA

LA ATMÓSFERA

Marcos F. Andrade Flores,

Laboratorio de Física de la Atmósfera, IIF-UMSA y
Department of Meteorology, Maryland University, USA.
mandrade@atmos.umd.edu

1.1. Composición de la atmósfera.

La atmósfera es el océano gaseoso que rodea a la Tierra. Está compuesta básicamente por un 78% de nitrógeno (N_2), un gas químicamente poco activo, y por un 21% de oxígeno (O_2), esencial para la vida. Ambos gases tienen una distribución bastante homogénea en la atmósfera hasta 100 km de altura, en el sentido que esos porcentajes se mantienen constantes. Esa región se denomina homosfera, mientras más arriba de 100 km la composición se hace variable con predominancia de moléculas y átomos livianos, de modo que esa región recibe el nombre de heterosfera. Una clasificación alternativa y más comúnmente usada está relacionada con la estructura térmica de la atmósfera. La misma se desarrolla más adelante.

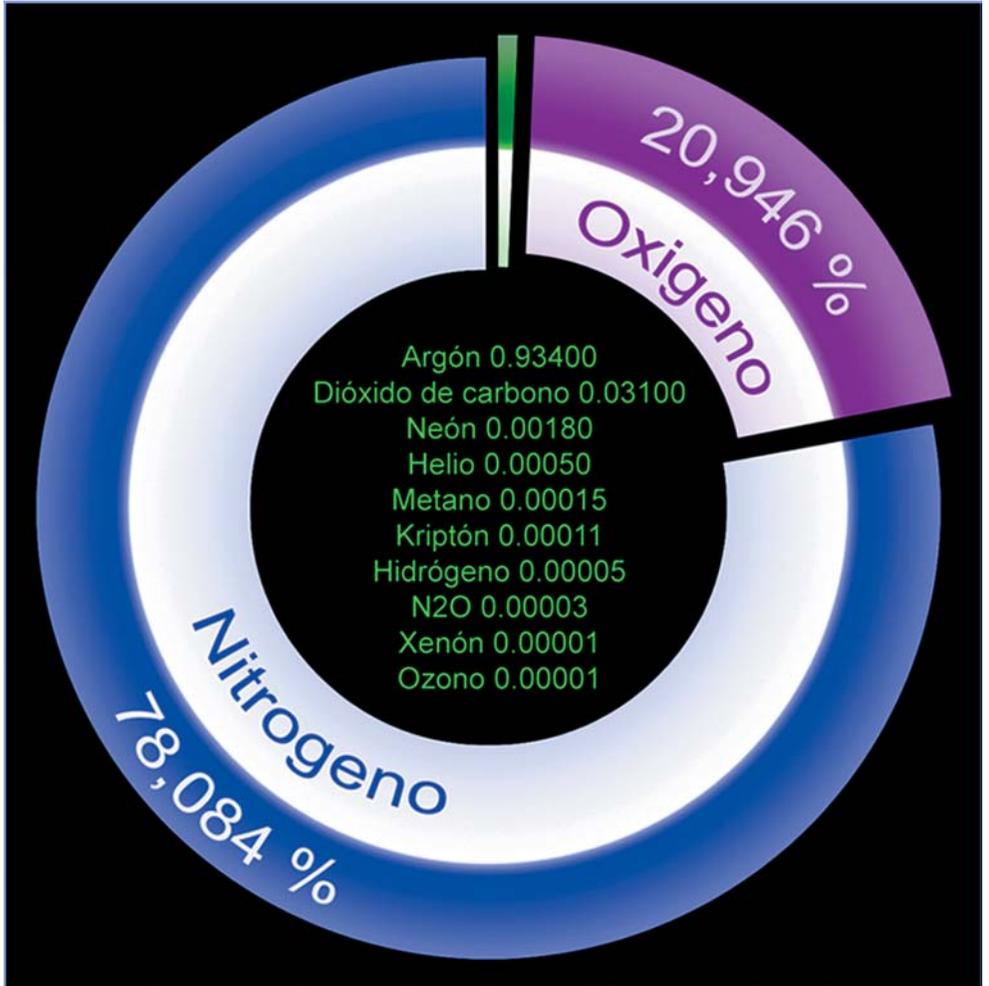
El restante 1% se distribuye, conforme a la Lámina I, entre una variedad de compuestos gaseosos, los cuales, no por ser poco abundantes, son menos importantes para el equilibrio de la atmósfera y la conservación de las condiciones necesarias para la vida como se desarrolló en el planeta Tierra. En general su concentración (número de moléculas por unidad de volumen) no es homogénea sino que varía principalmente con la altura. A continuación analizamos los más importantes gases que conforman el “grupo de minoría” de la atmósfera, llamados también “gases traza”.

- *Vapor de Agua (H_2O)*. Es el “gas” traza más importante en la atmósfera con un tiempo de vida medio de tan sólo días. Se manifiesta principalmente bajo forma de nubes. Su concentración es altamente variable dependiendo de las condiciones meteorológicas locales. Aquella disminuye rápidamente en los primeros kilómetros de altura (quedando la mayor parte de vapor de agua concentrado en los primeros 2 km) lo que explica la sequedad del clima en el Altiplano o en alta montaña. El porcentaje de vapor de agua cerca de la superficie te-

restre no supera el 2% en las zonas tropicales y disminuye a un valor máximo de 0.5% en las zonas polares. Por este motivo, la mayor cantidad del vapor de agua presente en la atmósfera se origina en los trópicos de donde es transportado a otras regiones del planeta. De este modo, la circulación atmosférica juega un rol muy importante en la redistribución de vapor de agua.

- *Dióxido de carbono (CO₂)*. Es un gas producido naturalmente por procesos químicos y biológicos cerca de la superficie terrestre. Además, en tiempos recientes, es producido masivamente por procesos antropogénicos relacionados con la combustión de hidrocarburos (petróleo y gas). Desde la revolución industrial su concentración se ha incrementado de 285 a 370 partes por millón en volumen (ppmv). Esto significa que actualmente en cada 10 litros de aire encontramos 3.7 centímetros cúbicos (cc) de CO₂. El dióxido de carbono es el principal responsable del “efecto invernadero”, que consiste en la capacidad de ese gas de absorber la energía irradiada por la superficie de la Tierra (radiación infrarroja) y mantener de ese modo la temperatura del planeta en niveles favorables al desarrollo de la vida (15°C en promedio). El ejemplo contrario es el planeta Marte, donde la ausencia de ese efecto, debido a su delgada atmósfera y, por tanto, a la baja concentración de CO₂, produce un fuerte salto térmico entre el día y la noche y por ende la imposibilidad de mantener condiciones favorables a la vida. Pero, una excesiva concentración de CO₂ en la atmósfera produce un intenso efecto invernadero, dando lugar al “calentamiento global”, uno de los grandes problemas ambientales del presente. Al existir más moléculas de CO₂ que atrapan y reenvían hacia la superficie terrestre parte de la energía emitida por ésta, la temperatura de la superficie debe incrementarse para lograr equilibrio termodinámico del sistema Tierra-Atmósfera (esto es, la misma energía que llega al sistema debe ser re-emitida hacia el espacio). En el Sistema Solar tenemos un ejemplo de esta situación límite: es el planeta Venus, cuyas temperaturas superficiales llegan a 733 K (ó 450 °C) por el efecto invernadero del CO₂, gas que compone el 96.5% de la atmósfera de Venus, y de las espesas nubes de ácido sulfúrico que ocultan su superficie a nuestra vista. Se estima que la presión en la superficie venusiana es 90 veces más alta que en la terrestre. Esto, unido al hecho que la energía recibida del Sol es casi el doble de la que arriba a la Tierra, produce el intenso efecto invernadero y, por ende, las altas temperaturas antes mencionadas. Volviendo a nuestro planeta, según algunas estimaciones, la temperatura de la Tierra se incrementaría aproximadamente 3°C si la concentración de CO₂ se duplicara. Esta estimación, sin embargo, debe ser tratada con cautela. La atmósfera terrestre es tan compleja que grandes variaciones de la concentración actual de CO₂

Lámina I



Torta de la composición de la atmósfera: obsérvese el bajo valor de la concentración del ozono, a pesar de su gran importancia en el equilibrio radiativo de la atmósfera.

probablemente producirían cambios en otros componentes y procesos en nuestra atmósfera que podrían incrementar o disminuir el efecto predicho. En todo caso, el peligro radica en que el sistema océano-atmósfera es un sistema no-lineal y que por tanto puede reaccionar de manera rápida (y tal vez inesperada) aún ante pequeñas perturbaciones. Estos cambios podrían producir efectos distintos en diferentes partes del planeta (sequías en un lado, inundaciones en otro, etc.) los cuales, a su vez, podrían tener efectos devastadores para muchos países.

- *Ozono (O_3)*. Es uno de los protagonistas de este libro, razón por la cual le dedicaremos el siguiente capítulo. La concentración del ozono en la atmósfera es, siguiendo con la Lámina I, muy baja, sin embargo el ozono es particularmente abundante en una región comprendida entre 15 y 50 km, dependiendo de la latitud y régimen meteorológico. Esa región se denomina la Capa de Ozono: es el ozono benéfico que protege la Tierra y la vida de gran parte de la radiación ultravioleta. En menor medida el ozono existe cerca de la superficie terrestre básicamente por efecto de la contaminación provocada por el hombre (polución): es el ozono troposférico o “malo” que provoca una serie de patologías en la salud humana y daños a plantas y animales. En general, las ciudades de Bolivia no presentan concentraciones elevadas de O_3 superficial, como suele suceder en otras grandes metrópolis americanas, como Santiago de Chile, Sao Paulo o México D.F., donde las concentraciones llegan a superar los 250 ppbv ($250/10^9$) por más de una hora. En el LFA-UMSA se ha medido durante algunos años esas concentraciones y se ha comprobado que en La Paz los picos de concentración del ozono apenas llegan a 50 ppbv en eventos episódicos. Asimismo, se han medido concentraciones en Cochabamba, considerada la ciudad más contaminada del país, que llegan a 95 ppbv, un valor aún por debajo de los niveles críticos recomendados internacionalmente. El contenido total de ozono en la atmósfera se mide en Unidades Dobson (DU). En promedio en el planeta hay 300 DU cuyo significado es el siguiente: si todo el ozono fuera llevado a nivel del mar a temperatura ambiente entonces ocuparía una capa de tan sólo 3 milímetros de espesor. Eso da una idea de cuán reducida es la concentración de ese gas en la atmósfera, en contraste con la importancia fundamental que tiene para la vida en el planeta.
- *Metano (CH_4)*. Este gas es producido principalmente de forma natural por bacterias y procesos superficiales muchas veces relacionados con actividades antropogénicas como la producción de combustibles fósiles, cultivos de arroz, quemados, etc. Este gas tiene una vida media relativamente larga por lo que se halla distribuido homogéneamente en la troposfera. La concentración prome-

dio en esta región es de aproximadamente 1.7 ppmv. A pesar de su baja concentración juega un papel muy importante en el efecto invernadero.

1.2. División de la atmósfera.

La división más común de la atmósfera se basa en el comportamiento de la temperatura (Lámina II).

- *Troposfera*: es la región que va de la superficie hasta una altura variable entre 8 y 18 km dependiendo de la latitud. A la latitud tropical de Bolivia, la troposfera llega hasta unos 18 km de altura, mientras en los polos puede alcanzar apenas unos 8 km. La figura 1.1 muestra el perfil de temperatura obtenido mediante sondas en junio de 1998 en La Paz. La troposfera se caracteriza por tener una temperatura descendente con la altura. Desde 15°C promedio en superficie la temperatura puede descender hasta aproximadamente -80°C en el tope de esta región. En la troposfera se desarrolla la vida y la tecnología del hombre. Esta región se estudia con sensores ópticos y químicos colocados en superficie o a bordo de sondas y con otros instrumentos sofisticados como el LIDAR (láser + radar) e instrumentos a bordo de satélites.

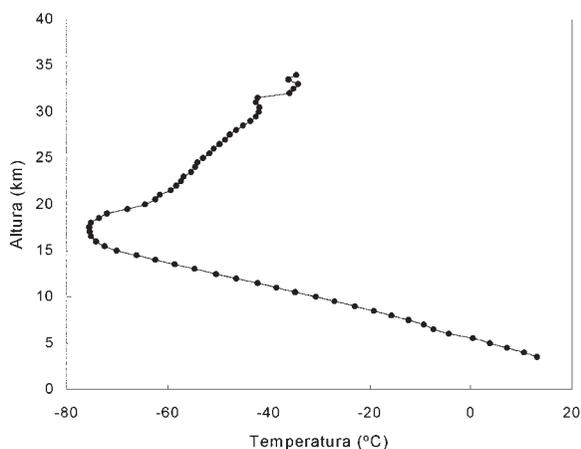
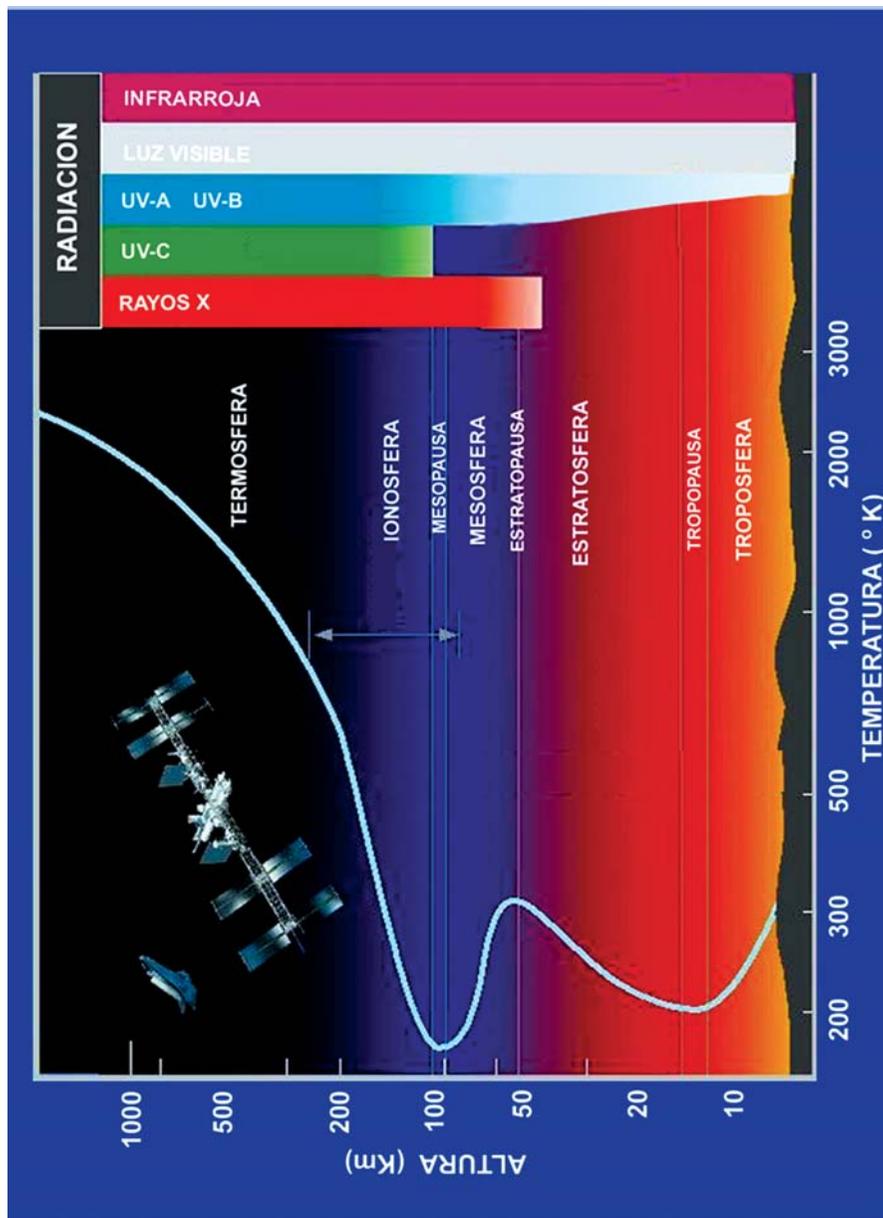


Figura 1.1 Perfil de la temperatura de la atmósfera de La Paz, según el radiosondeo realizado en el mes de junio de 1998 desde Cota Cota.

- A la troposfera le sigue la *Estratosfera*, que llega hasta 50 km y se caracteriza por un incremento de temperatura con la altura, debido a la absorción selec-

Lámina II



Representación gráfica de la división de la atmósfera, según la temperatura, según la temperatura. También a la derecha se indica el diferente grado de penetración de la radiación solar.

tiva de la radiación solar por especies como el ozono. Como su nombre lo sugiere, se trata de una región muy estratificada y donde el movimiento vertical está fuertemente restringido. Los estudios de la estratosfera se realizan desde superficie con instrumentos ópticos, mediante sondas y globos aerostáticos así como instrumentos a bordo de satélites. En los últimos años se utilizan también aviones acondicionados para volar a gran altura.

- La *Mesosfera* llega hasta 100 km. En esa región la temperatura vuelve a bajar drásticamente. Estudios de esta región y de las superiores se realizan con cohetes.
- Más arriba de la mesosfera, hasta 500 km de altura, la atmósfera recibe el nombre genérico de *Termosfera* y le sigue la *magnetosfera*, región con densidad de aire prácticamente nula. La temperatura vuelve a subir hasta 1000 K. En esa región orbitan la mayoría de los satélites artificiales.

1.3 Origen de la atmósfera terrestre.

La atmósfera terrestre no siempre ha tenido la composición descrita en el inciso anterior. Desde la formación del planeta, la atmósfera ha cambiado dramáticamente como resultado de procesos externos e internos. Evidencia isotópica, relacionada con el bajo contenido de gases nobles, sugiere que la atmósfera terrestre es de origen secundario y que no es el resultado del secuestro gravitacional de gases de la nébula solar en la etapa temprana de formación del planeta.

Uno de los procesos fundamentales en la formación no sólo de la atmósfera terrestre sino del planeta mismo, fue la acreción de planetesimales (formación del planeta por la colisión inelástica de cuerpos menores). Por su cercanía al Sol es poco probable que los planetesimales que formaron la Tierra primitiva hubieran estado compuestos por carbono, nitrógeno o agua en cantidades abundantes (a diferencia de aquellos formados lejos de nuestra estrella). Por tanto, la degasificación de elementos presentes en los planetesimales primarios debió formar una atmósfera muy diferente a la presente. Algunas teorías sugieren que la acreción de planetesimales exteriores “agregó” a la Tierra los elementos antes mencionados. Este proceso pudo no solo transportar agua y otros elementos al planeta en formación sino calentar su superficie (producto del choque) para producir una atmósfera densa en vapor de agua. La misma pudo haber sido removida por un choque semejante al que produjo la formación de nuestra Luna hacia el final del periodo de acreción. Si éste fue el caso, los gases que ahora componen nuestra atmósfera habrían sido trans-

portados posteriormente por cometas y asteroides provenientes de la banda situada en la parte externa del sistema solar. Esto está relacionado al hecho que hace aproximadamente 4500 millones de años, cuando la Tierra estaba en estado de formación, la probabilidad de colisión de nuestro planeta con desechos de asteroides y cometas era mucho más alta de lo que es ahora. Es más, se cree que en los primeros 600 millones de años de existencia de nuestro planeta, cuerpos del orden de hasta 100 km de diámetro chocaron con él con relativa frecuencia.

Existen sin embargo, otras teorías que afirman que si existió una atmósfera primitiva que contenía altas cantidades de vapor agua, esta fue fotodisociada por radiación UV proveniente del Sol (¡no existía capa de ozono que protegiera la Tierra!) y que el hidrógeno liberado se perdió al espacio por procesos hidrodinámicos. De ese modo, una atmósfera residual rica en carbono y nitrógeno (necesaria para la formación de la vida) habría quedado establecida. Por último, otros modelos sugieren que no existió tal cantidad de vapor de agua en la atmósfera primitiva y que todos los elementos precursores de la vida (o su sustento) fueron traídos al planeta por asteroides o cometas. Como sea que haya sido, parece ser que hace unos 3800 millones años una atmósfera rica en carbono, nitrógeno y trazas de oxígeno quedó finalmente establecida en nuestro planeta.

La actividad volcánica jugó y juega hasta hoy en día un importantísimo papel en la composición de la atmósfera terrestre. A través de aquella se inyectan a la atmósfera importantes cantidades de carbono y azufre. Este último pudo jugar un significativo rol luego de la aparición de los primeros organismos vivos. El H_2S , o el SO_2 , emitido por actividad volcánica pudo haber sido convertido en otras moléculas gaseosas de azufre, entre ellas el S_8 . Este elemento tiene la propiedad de absorber muy eficientemente la radiación UV y por tanto pudo proteger a las primeras formas de vida de una manera adecuada. Sin embargo para que este mecanismo funcione exitosamente la temperatura de la Tierra debió haber sido por lo menos unos $30^\circ C$ mayor a la actual. Esto implicaría una atmósfera mucho más rica en dióxido de carbono que la presente. ¿Fue esto posible?

Desde hace muchos años los astrónomos saben que el Sol ha ido incrementando su luminosidad gradualmente. Cuidadosos análisis indican que hace 4600 millones de años la luminosidad del Sol era una 30% menor que la actual y que la misma se ha elevado casi linealmente hasta los valores presentes. Y aunque hay evidencias que la Tierra ha sufrido glaciaciones globales en ciertos periodos de su existencia ("Iceball theory"), no existen datos que prueben que la misma estuvo completamente cubierta por hielo por periodos muy largos (en escalas geológicas). Esto implica que la temperatura del planeta tuvo que estar por encima del punto

de congelamiento la mayor parte del periodo anterior a los últimos 2 millones de años. La explicación más plausible es que la concentración de CO_2 era mucho más alta que la presente en varios órdenes de magnitud (al menos cientos de veces) de modo que el efecto invernadero hubiese permitido mantener la temperatura del planeta por encima del punto de congelamiento.

La atmósfera primitiva descrita hasta ahora contiene muy poco oxígeno comparada con la actual. Y, justamente, la aparición de este elemento en nuestra atmósfera es una de las transformaciones más dramáticas de todas en la historia terrestre. ¿Cómo logra este vital gas alcanzar la concentración presente? Aunque hay discusión de cómo ocurrió, se cree que hasta alrededor de 2400 millones de años atrás la concentración de oxígeno en la atmósfera era extremadamente baja (del orden de 10-14 veces menor que la actual). Algunos investigadores sugieren que entre 2400 y 2100 millones de años atrás, organismos unicelulares fueron capaces de descomponer agua en hidrógeno y oxígeno, en tanto que otros proponen una aparición más temprana de oxígeno libre. Como quiera que fuere, las primeras células complejas, aquellas similares a las que componen a las plantas y animales presentes, aparecen en fósiles de 2100 millones de antigüedad, justamente después del incremento de oxígeno en nuestra atmósfera. Con la aparición de este tipo de organismos, la producción y acumulación de oxígeno se aceleró permitiendo de este modo que la concentración de oxígeno alcanzara los niveles presentes (¡aunque el proceso pudo durar unos 1500 millones de años!). Paralelamente a la acumulación de oxígeno apareció ozono estratosférico que protegió a los seres vivos de la radiación UV permitiendo, a su vez, mejores condiciones para el desarrollo de la vida. Se cree que con niveles de oxígeno 1000 veces menores a los actuales la capa de ozono comenzó a ser efectiva y que la misma quedó firmemente establecida una vez que niveles del orden de un centésimo de nuestra atmósfera fueron alcanzados.

La atmósfera actual está altamente controlada por procesos biológicos. Compuesta principalmente por nitrógeno, oxígeno, agua y dióxido de carbono, la nuestra no es una atmósfera que pudiera ser mantenida por procesos químicos solamente. Sin procesos biológicos que la mantengan, la atmósfera perdería gran parte del oxígeno por oxidación o por reacción con el nitrógeno con quien formaría ácido nítrico. Asimismo, los niveles de CO_2 probablemente se incrementarían quedando una atmósfera compuesta principalmente por nitrógeno y dióxido de carbono. Así, la vida juega un papel preponderante en mantener un medio habitable en nuestro planeta.

BIBLIOGRAFIA CONSULTADA CAPITULO 1

1. Broecker, W.S. How to build a habitable planet. s.l.: s.e., 1998.
2. Engels, M.; Macko, S.(ed). Evolution of the Earth s atmosphere and hydrosphere: hadean to recent, J.F. Kasting en organic geochemistry: principles and applications, s.l.: Plenum press, 1993.
3. Holland, H.D. The chemical evolution of the atmosphere and oceans. s.l.: Princeton Univ. Press., 1998.
4. Salby, M. Fundamentals of atmospheric physics. s.l.: Academic Press, 1996.
5. Ward, P.; Brownlee, D. Rare Earth. s.l.: Copernicus (Springer-Verlag), 2000.
6. Wayne, R.P. Chemistry of atmospheres. s.l.: Cleredon Press, 1991.

LA CAPA DE OZONO Y EL AGUJERO ANTÁRTICO

Javier Cacho,

Instituto Nacional de Técnicas Aeroespaciales,
Madrid, España
cacho@inta.es

Desde hace casi dos décadas, con la llegada de la primavera austral, los medios de comunicación alertan sobre la aparición de un nuevo agujero de ozono sobre la Antártida. Las noticias no pueden ser más preocupantes porque, con raras excepciones, la destrucción del ozono crece año tras año, amenazando a las poblaciones más meridionales de Sudamérica, sin que, aparentemente, surjan efecto las medidas internacionales tomadas, dentro del Protocolo de Montreal, para proteger la capa de ozono.

2.1. Un gas vital.

El ozono es un gas presente en la atmósfera en muy pequeñas cantidades, aproximadamente una parte en un millón en volumen; pese a su reducido contenido tiene la propiedad, esencial para que la vida sobre la Tierra evolucionase hacia las formas de vida que hoy conocemos, de filtrar la parte más energética de la radiación ultravioleta solar. Sin embargo, su posición en altas capas de la atmósfera, inaccesible incluso desde las montañas más elevadas, le hicieron pasar desapercibido para la ciencia hasta finales del siglo XIX.

Durante centenares de millones de años la capa de ozono ha desempeñado eficazmente su papel hasta iniciarse la emisión a la atmósfera, a mediados del siglo pasado, de cierto tipo de gases conocidos como CFC. Estos gases, en cuya composición intervenían átomos de cloro y bromo, eran aparentemente inofensivos y su extraordinaria estabilidad química, junto a otras propiedades, hizo que sus aplicaciones se multiplicasen en poco tiempo hasta que sus emisiones a la atmósfera superaron el millón de toneladas anuales.

En los años setenta, se descubrió que los átomos de cloro, contenidos en los CFC, podrían comenzar un ciclo de destrucción catalítica del ozono, en el que cada átomo de cloro podría destruir varios miles de moléculas de ozono. Investigaciones posteriores demostraron que ese proceso no tenía lugar exactamente así, puesto que el cloro tenía mayor afinidad por otros compuestos atmosféricos y reaccionaba antes con ellos para dar ClH o ClONO₂, formas en las que el cloro quedaba, diríamos que, “secuestrado”, y por lo tanto no tenía lugar, de forma inmediata, una masiva destrucción de ozono. Sin embargo, dado su peligro potencial, desde ese momento comenzaron reuniones internacionales para eliminar el vertido de CFC a la atmósfera.

2.2 Génesis de su descubrimiento.

En este estado de cosas, en 1984 un científico japonés informó de que algo anómalo estaba sucediendo con el ozono antártico, pocos meses después, investigadores británicos, que llevaban midiendo el ozono en aquellas regiones desde 1956, corroboraron la disminución de ozono; posteriormente, las observaciones de satélites norteamericanos confirmaron que el misterioso fenómeno se extendía por toda la Antártida, la región más remota y libre de contaminación del planeta. A partir de entonces, las imágenes en falso color de la destrucción de ozono sobre la Antártida se han hecho tristemente célebres y el fenómeno comenzó a ser conocido como “agujero de ozono” (figura 2.1).

En un tiempo extraordinariamente corto se prepararon las primeras expediciones científicas a la Antártida para establecer las anomalías que estaban teniendo

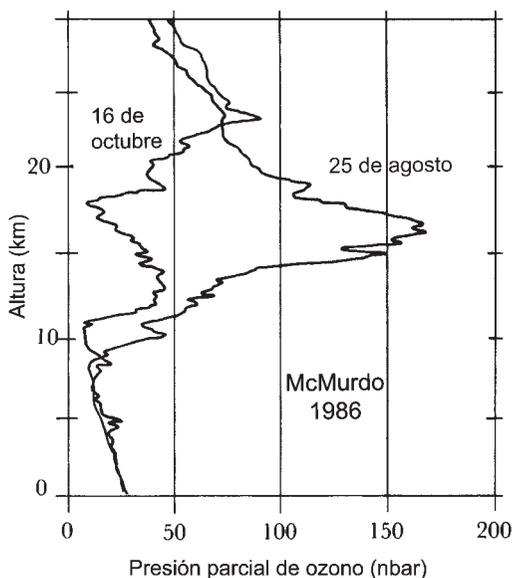


Figura 2.1. Comparación de perfiles verticales. Se comparan los valores de ozono registrados en el año 1986 durante dos sondeos de la atmósfera desde la estación de McMurdo: el 18 de agosto, cuando todavía no se había producido el agujero de ozono, y el 13 de octubre, cuando el agujero estaba en su máxima virulencia.

lugar en su atmósfera, mientras en los laboratorios se trataron de reproducir sus características más significativas en la búsqueda de nuevas reacciones que pudieran justificar la rápida destrucción de ozono que tenía lugar todos los años al comienzo de la primavera austral.

Las observaciones realizadas en estas primeras campañas antárticas localizaron la altura donde se estaba produciendo la destrucción, entre los 12 y los 20 kilómetros, comprobando que en esta zona desaparecía completamente el ozono; otro de los resultados, en este caso obtenido mediante las observaciones de los satélites, fue circunscribir el agujero de ozono al interior del vórtice antártico, un cinturón de vientos huracanados de hasta 400 km/h de velocidad que durante el invierno y parte de la primavera rodean la estratosfera antártica, aislándola completamente de las masas de aire de los alrededores. (Lámina III)

Finalmente, el resultado más espectacular, conseguido mediante un avión estratosférico (un antiguo avión espía U-2 reconvertido para fines científicos) fue el detectar, en el interior del agujero de ozono, altas concentraciones de cloro activo, entre 100 y 200 veces superior a la de cualquier punto del planeta. Desde ese momento ya no se podía dudar del protagonismo de los CFC en la destrucción del ozono, dado que las 4/5 partes del cloro estratosféricos tienen su origen en estos gases.

2.3 La contaminación no respeta fronteras.

Uno de los aspectos que más sorprende del agujero de ozono es el hecho de que, si el origen de la destrucción del ozono está en gases contaminantes emitidos, principalmente, por los países industriales, la mayor parte situados en el hemisferio norte, cómo es posible que el ozono se destruya en la Antártida, la zona más limpia del planeta y la más alejada de los focos de contaminación.

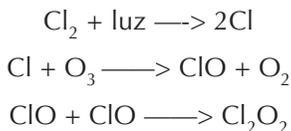
La respuesta comienza en las especiales características de los CFC, unos gases extraordinariamente estables químicamente que no reaccionan con otros compuestos de la atmósfera, ni se disuelven en el agua de lluvia, por lo que su "vida media" es muy elevada, algunos más de 100 años (incluso 1.700 años en el caso del CFC-115). Durante este tiempo el viento los desplaza hasta el ecuador y los trópicos, donde las grandes corrientes ascendientes de aire los inyectan en la estratosfera. Allí, continúan su ascenso en un proceso que dura más de una década, hasta que una vez sobrepasada la capa de ozono comienzan a recibir radiación ultravioleta solar que rompe la molécula de CFC liberando los átomos de cloro que contienen. En ese momento son "secuestrados" en compuestos inertes hacia el ozono, pero

que la célula convectiva única de la estratosfera, se encarga de distribuirlos por todo el planeta, con independencia del lugar donde se hayan originado (Lámina IV).

2.4 La temperatura, clave del fenómeno.

A través de este mecanismo de transporte, los compuestos que contienen el cloro "secuestrado" (básicamente ClH y ClONO₂) alcanzan la Antártida. Una vez allí, al llegar el invierno, la ausencia de radiación solar hace que la temperatura de la estratosfera disminuya mientras se establece una corriente circulatoria en torno al Polo Sur, el vórtice polar, que aísla su atmósfera impidiendo los intercambios de aire con las zonas limítrofes (Lámina III). En estas condiciones, cuando la temperatura de la estratosfera desciende por debajo de -80°C comienzan a formarse las Nubes Estratosféricas Polares, un tipo de nubes extraordinariamente especial, formadas por cristales de NO₃H, sobre cuyas superficies se producen reacciones de química heterogénea, que en un corto periodo de tiempo "rompen" las moléculas que tenían secuestrado al cloro para liberar a la atmósfera Cl₂, que aunque todavía no reacciona con el ozono, se va almacenando en la estratosfera durante todo el invierno.

Con la tenue luz del final del invierno antártico el Cl₂ se transforma en dos átomos de cloro activo que inicia el proceso de destrucción del ozono.



En otras circunstancias el ClO sería nuevamente capturado por el NO₂ para volver a dar ClONO₂, pero sobre esas Nubes Estratosféricas se ha desarrollado un proceso paralelo que ha desnitrificado la atmósfera impidiendo esas reacciones que inactivarían al cloro. En cualquier caso, el cloro ha vuelto a ser secuestrado en el dímero del monóxido de cloro, Cl₂O₂, evitando mayores destrucciones de ozono. Sin embargo, con la llegada de la primavera y la primera radiación ultravioleta a la estratosfera antártica, ésta rompe el dímero del monóxido de cloro liberando definitivamente a la atmósfera al cloro que inicia un ciclo catalítico de destrucción de ozono que provoca la aparición del agujero de ozono.

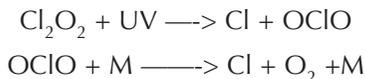
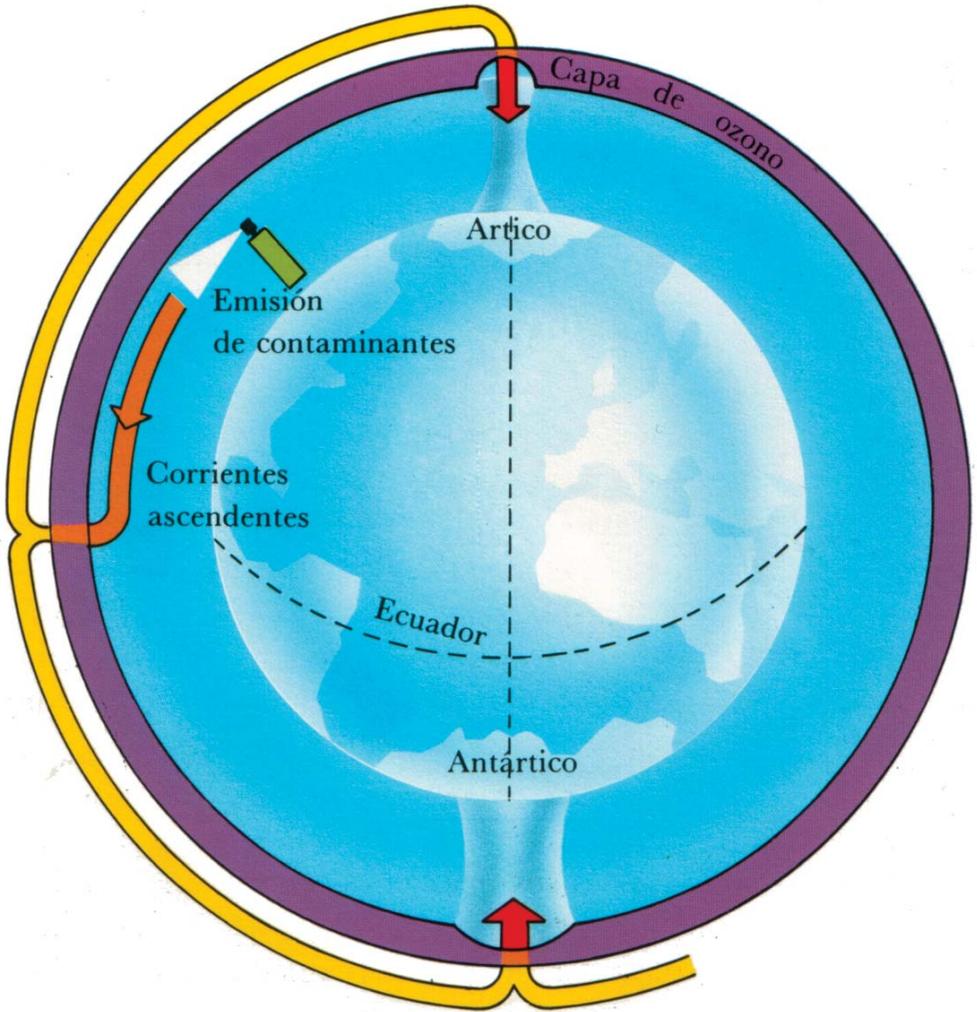
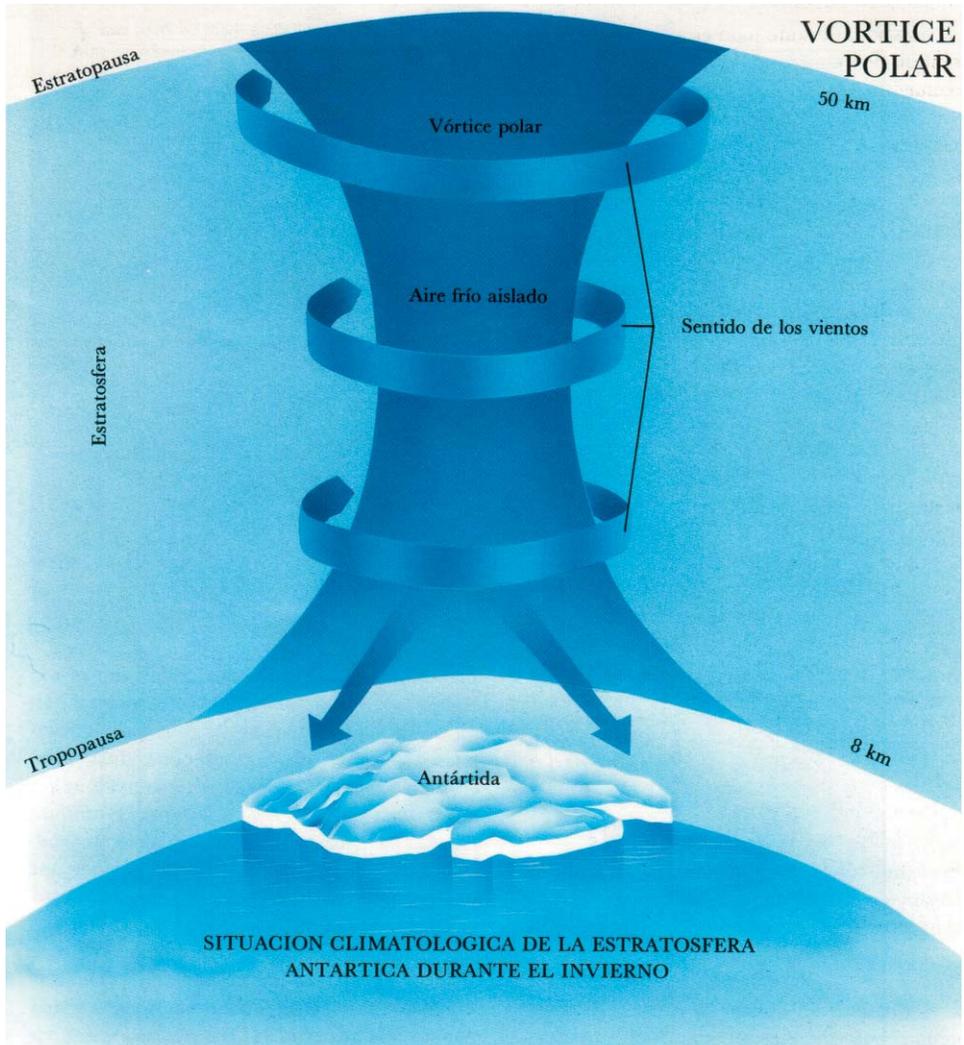


Lámina III



Camino seguido por los CFC para llegar a los polos.

Lámina IV



*Vórtice polar antártico.
Situación climatológica de la estratosfera antártica durante el invierno.*

En paralelo a este proceso tiene lugar un mecanismo similar que tiene como protagonista al bromo, en lugar del cloro, y que es responsable de la tercera parte de la pérdida del ozono.

Finalmente, hacia el final de la primavera, el calor que la radiación solar ha suministrado a la atmósfera antártica debilita el gradiente de temperatura, desestabilizando al vórtice polar, hasta que este se “rompe” y se disuelve. Eliminada esa barrera invisible, las masas de aire de los alrededores se mezclan con la del agujero de ozono, aportando compuestos nitrogenados que inmediatamente “secuestran” al cloro libre, cesando así la destrucción de ozono. Evidentemente, este proceso de mezcla hace disminuir hasta un 10% el contenido de ozono sobre Sudamérica y Nueva Zelanda.

2.5 Una recuperación que no acaba de llegar

Desde la entrada en vigor del Protocolo de Montreal, el uno de enero de 1989, las emisiones de CFC han disminuido drásticamente, aunque, dado que los procesos de eliminación de estos gases de la atmósfera son muy lentos, sus concentraciones atmosféricas no han registrado disminuciones similares. En cualquier caso, desde mediados de la pasada década la concentración atmosférica de CFC-11 y CFC-12 (probablemente los dos compuestos de la familia de los CFC con mayor responsabilidad en la destrucción de ozono), ha comenzado a estabilizar, después de haber estado creciendo vertiginosamente desde los años 50. En el caso del CFC-11, las observaciones parecen indicar que incluso puede haber alcanzado su valor máximo y haber iniciado ya una lenta disminución (figuras 2.2 y 2.3)

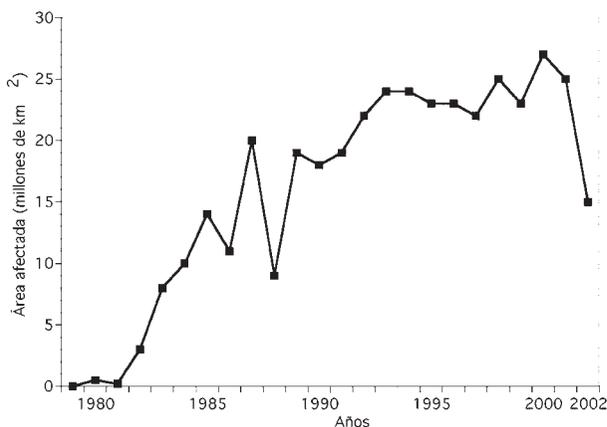


Figura 2.2. Evolución del área afectada. Evolución a lo largo de los años del tamaño del agujero de ozono (definido como el área donde el contenido de ozono es inferior a 220 unidades Dobson). El récord se alcanzó el año 2000 con un área afectada de 26,4 millones de kilómetros cuadrados.

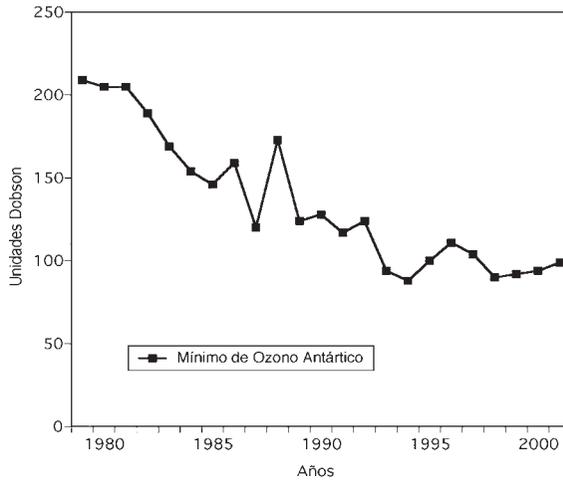


Figura 2.3. Evolución del agujero de ozono. Variación a lo largo de los años del valor mínimo de ozono registrado cada año; es un índice de la intensidad de la destrucción de ozono. (Fuente de los datos: NASA).

Esto significa que, pese a las medidas en vigor, que se han endurecido paulatinamente, el contenido de cloro y bromo de la estratosfera sigue siendo muy alto, lo que impide que se observen signos de recuperación en el fenómeno antártico. De hecho, el récord histórico del agujero de ozono se alcanzó en el año 2000, cuando se extendió sobre casi 30 millones de kilómetros cuadrados (el equivalente a casi treinta veces la superficie de Bolivia). Un año más tarde, en el 2001, el agujero de ozono abarcó una superficie ligeramente menor que la del año anterior, pero tanto la duración como la intensidad de la destrucción de ozono fueron muy similares a la de años anteriores.

En cuanto al último año, el 2002 ha sido especialmente sorprendente, dado que desde la aparición del fenómeno no había tenido lugar un año tan anómalo. Por una parte, la superficie sobre la que se ha extendido ha sido mucho más pequeña que años precedentes, por otra, se ha dividido en dos y ha desaparecido un mes antes que lo que venía siendo normal hasta ahora. Sin embargo, el origen de tan anómalo comportamiento no parece estar en un descenso de las concentraciones de compuestos clorados, sino en la temperatura de la estratosfera antártica, muy superior a la normal, que ha llevado a una prematura “rotura” del vórtice polar y a la pérdida de las condiciones de aislamiento.

2.6 Previsiones optimistas, pero lejanas

Desde hace años el Programa de Naciones Unidas para el Medio Ambiente y la Organización Meteorológica Mundial, encargan a un selecto grupo de científicos la preparación de informes que resuman las últimas informaciones relacionadas con la capa de ozono y ponderen su evolución futura, en el marco de los acuerdos internacionales para limitación de las emisiones de gases que provocan el deterioro de la capa de ozono. El último de estos informes fue presentado en julio del 2002, y ha sido realizado utilizando un volumen ingente de información y casi una docena diferente de modelos químicos de evolución de la atmósfera, su objetivo era tratar de establecer cuándo sería posible observar los primeros signos de recuperación de la capa de ozono.

Sus resultados no pueden ser más prudentes ya que concluyen que podrán observarse la recuperación del ozono en la mayor parte de las regiones del planeta en los próximos 15 años, aunque es probable que en Sudamérica, Nueva Zelanda y Sudáfrica, la recuperación se observe antes. Todo eso, como indican en las conclusiones de su estudio, si en ese tiempo no se producen grandes erupciones volcánicas, ni se produce un enfriamiento de la estratosfera debido a la intensificación del efecto invernadero y se cumplen, además, todos los compromisos contemplados en el Protocolo de Montreal.

BIBLIOGRAFIA CONSULTADA CAPITULO 2

1. Cacho, J.; Sainz, M.J. Antartida: el agujero de ozono. s.l.: Tabapress, 1989.

EL OZONO EN BOLIVIA

Francesco Zaratti,

Laboratorio de Física de la Atmósfera, IIF-UMSA
La Paz, Bolivia
fzs1@o3-bolivia.org

3.1. Ozonosondeos.

Bolivia, mediante el Instituto de Investigaciones Físicas (antes *Laboratorio de Rayos Cósmicos de Chacaltaya*), ha sido un país pionero en los estudios del ozono superficial y atmosférico. En efecto, mucho antes que se descubriera el agujero de ozono y se pusiera de moda la investigación de ese gas, se realizaron en Bolivia algunos trabajos importantes.

Los años 1963-1966 vieron por lo menos tres trabajos en esa área: un estudio del ozono superficial en Chacaltaya (*Zelaya, 1964*), con el fin de buscar una correlación entre rayos cósmicos y ozono en esa localidad, una investigación sobre variaciones de ozono durante el eclipse total de sol del 12/11/1966, (*Schulczewsky y Sheriff, 1968*), y, más interesante, una campaña sistemática de ozonosondeo con el fin de establecer el perfil del ozono con la altura (*Aldaz L., 1964*). Las sondas eran lanzadas desde el actual Campus universitario de Cota Cota y se recibían los datos vía radio desde las sondas que, después de elevarse hasta 30 y más km, reventaban y se perdían en algún paraje de la cordillera o del altiplano. Treinta y cinco años después, desde el mismo lugar, pero en un contexto diferente debido al descubrimiento del debilitamiento de la capa de ozono, se realizó una nueva campaña, conjuntamente entre el Laboratorio de Física de la Atmósfera de la UMSA y el Instituto de Pesquisas Espaciais del Brasil (INPE).

En las figuras 3.1 y 3.2 se reproducen dos típicos ozonosondeos del año 1964 y del año 1998. En general es posible afirmar que el perfil del ozono en la atmósfera boliviana, al igual que la columna total, no ha cambiado significativamente en los últimos 40 años.

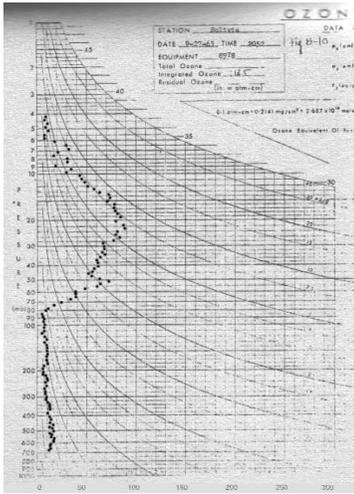


Figura 3.1. Perfil de ozono obtenido el año 1963 desde Cota Cota (La Paz) por Luis Aldaz y colaboradores del Laboratorio de Física Cósmica de Chacaltaya (actualmente, Instituto de Investigaciones Físicas).

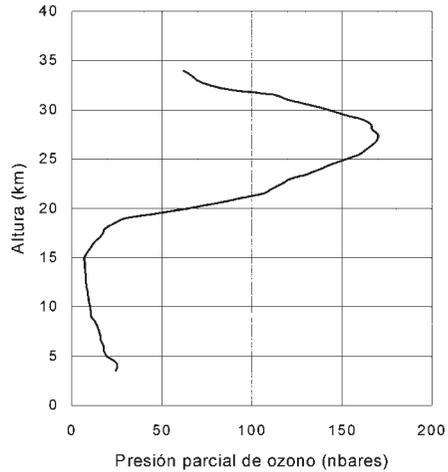


Figura 3.2. Perfil de ozono obtenido desde Cota Cota, en junio de 1998 durante la campaña conjunta de ozonosondeo del LFA-UMSA y el INPE-Brasil.

3.2 Medidas de ozono en el Altiplano Boliviano.

En los últimos años se ha podido contar con dos clases de medidas del ozono total sobre el Altiplano: desde la superficie y desde el espacio. Desde 1996 opera en La Paz un espectrofotómetro Brewer (Lámina V) un instrumento muy sofisticado de propiedad del INPE-Brasil, que mide, entre otros, el contenido de ozono en la atmósfera y la intensidad de la radiación ultravioleta. Asimismo, desde el año 1978, con algunas interrupciones, se realizan medidas de ozono total mediante el instrumento TOMS (Total Ozone Mapping Spectrophotometer) lanzado por la NASA, primero a bordo del satélite Nimbus 7 y luego (desde 1996 hasta la fecha) en el satélite Earth Probe. Ese instrumento proporciona el valor diario del ozono y de la radiación ultravioleta para diferentes localidades de la Tierra. Una de éstas es La Paz, que se encuentra a 16.5°S y 68.1°W, de modo que es posible comparar y complementar las medidas de superficie con las del satélite. Los datos satelitales son accesibles al público en la página de la Internet <http://jwocky.gsfc.nasa.gov> bajo formato numérico o gráfico.

A continuación reportamos en figura 3.3 los valores promedio mensuales del TOMS para La Paz, junto a los mismos valores proporcionados por el Brewer 110

Lámina V



Fotografía del espectrofotómetro Brewer MKIV, de propiedad del INPE-Brasil y en operación al LEA-UMSA desde 1996. Al fondo la ciudad de La Paz, en primer plano se ve un sensor de radiación ultravioleta YES UVB-1.

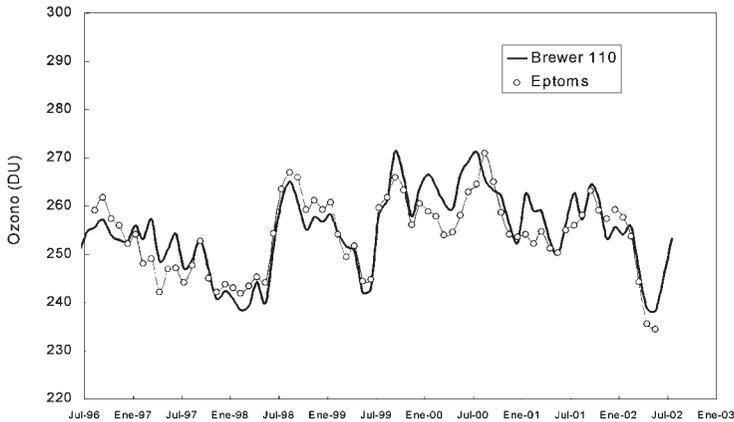


Figura 3.3 Serie temporal de la columna total de ozono (promedios mensuales) medida por el instrumento TOMS, desde el satélite Earth Probe, y por el Brewer MKIV en operación en el LFA-UMSA, Cota Cota, La Paz. Dentro del error estadístico los dos instrumentos dan los mismos valores.

de La Paz, en el período julio 1996 a junio 2002 (6 años). La observación de la figura nos permite afirmar terminantemente que:

- Los dos instrumentos dan, dentro del error experimental, los mismos valores, con pocas excepciones (el año 2000);
- Los valores de ozono en La Paz no resienten del fenómeno del agujero de ozono antártico, debido a su lejanía de esa región polar.
- El intervalo de valores promedios mensuales del ozono en La Paz está entre 238.3 DU (junio 2002) y 271.4 DU (octubre 1999), con un valor promedio de 254.8 DU.
- Sin embargo, los valores del ozono sobre el Altiplano son particularmente bajos, entre los más bajos del planeta, debido a su cercanía al Ecuador (la cantidad de ozono promedio disminuye yendo desde los polos hacia el ecuador), a la altura (debido a la reducción de la atmósfera) y a otro posible fenómeno que se encuentra en estudio (anomalía del ozono sobre el altiplano, ver siguiente párrafo)
- Existe variabilidad entre un año y otro, debido a los ciclos de actividad solar y a fenómenos complejos globales, con periodicidad de dos o tres años (*Quasi Biennial Oscillation*, QBO). De hecho es posible que los valores más elevados de ozono el año 2000 se deban al máximo de actividad solar, unido al fenómeno QBO.

También es interesante observar el ciclo anual del ozono altiplánico (figura 3.4): el ozono se incrementa en primavera (septiembre-octubre) y muestra valores mínimos en otoño-invierno (mayo-junio). En un cierto sentido esto es providencial ya que el ozono suele aumentar en los meses en que se tiene mayores niveles de radiación ultravioleta.

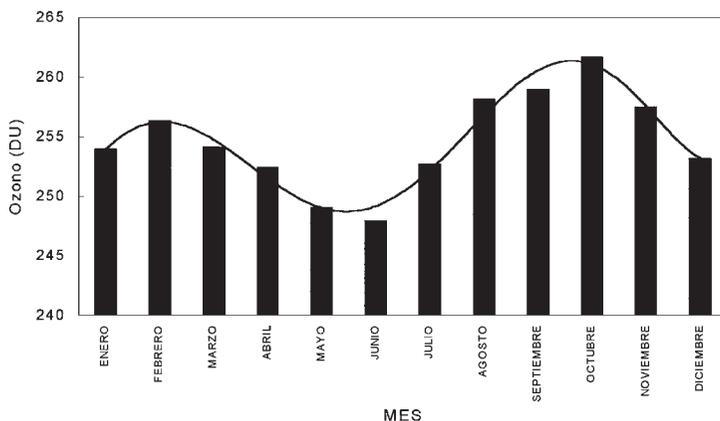


Figura 3.4. Ciclo anual de los promedios mensuales de la columna de ozono, a lo largo de seis años (1996-2002). Obsérvese que los máximos se registran en primavera y los mínimos en invierno, aunque la diferencia entre máximos y mínimos apenas supera los 10 DU.

3.3. La anomalía del ozono en el Altiplano.

El análisis de los datos satelitales (TOMS) permite detectar visualmente una anomalía de la distribución del ozono sobre el Altiplano, fenómeno llamado impropriadamente “miniagujero de ozono”. La Lámina VI muestra el significado de esa expresión. Durante todo el año, pero con acentuación en algunos meses invernales, la cantidad de ozono sobre el altiplano andino se reduce considerablemente con respecto a los valores que el instrumento TOMS mide sobre el océano a la misma latitud. La magnitud de la diferencia (15 – 20 DU) no parece explicable exclusivamente con la reducción de la atmósfera debido a la altura, ni la ubicación de los valores mínimos en medio del altiplano permite correlacionarlos con los elevados picos andinos. Por esa razón se ha postulado la presencia de fenómenos dinámicos en la estratosfera (Zaratti, 1999), hipótesis que, sin embargo, no encuentra unanimidad en la comunidad científica internacional (Kirchhoff, 2002).

Lámina VI

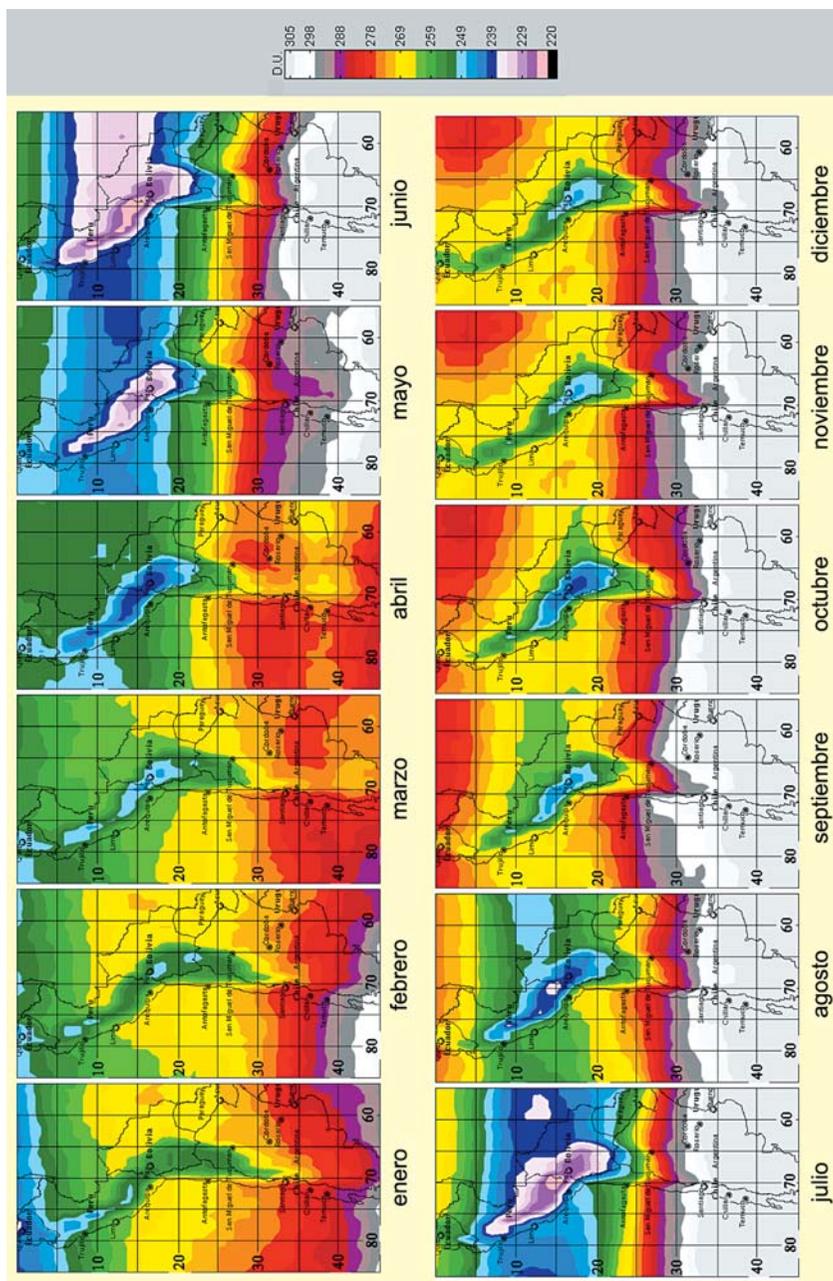


Imagen en falso color de la anomalía del ozono sobre el Altiplano a lo largo del año 1992. El fenómeno es más acentuado en el mes de mayo. (Elaboración del Lic. Renán Cabrera).

Actualmente se llevan a cabo estudios más detallados para poder llegar a conclusiones más robustas en torno a ese fenómeno.

BIBLIOGRAFÍA CONSULTADA CAPÍTULO 3

1. Aldaz, Luis. Atmospheric ozone above La Paz, Bolivia. En: Final technical Report contract AF-AFPSR 63-319. La Paz: Laboratorio de Física Cosmica., ago. 1964, pp. 32-9. (Cuaderno No. 27).
2. Kirchhoff, V.W.J.H.; Guarnieri, F.L. Missing ozone at high altitude: comparison of in situ satellite data. s.l.: JGR, 10.1029/2001JD000810, 2002.
3. Schulczewsky, R.H. y Sheriff, F. Perfiles de ozono, eclipse solar del 12 de noviembre de 1966. En: Saavedra O. ed. Resumen de labores. La Paz: s.e., mar. 1968, 153-9. (cuaderno No. 31).
4. Zaratti, F.; Andrade, R.; Forno, R.; Palenque, E.R. Longitudinal and latitudinal variations of the total ozone over the Central Andes. En: II Nuevo Cimento (vol. 22c, N. 2).s.l: s.e., 1456-152, 1999.
5. Zelaya, A. Medidas de ozono de superficie en Chacaltaya. En: Vidaurre, R. ed. Resumen de labores. La Paz: s.e., nov. 1964, 60. (cuaderno No. 26).

LA RADIACIÓN ULTRAVIOLETA SOLAR

Francesco Zaratti,

Laboratorio de Física de la Atmósfera, IIF-UMSA
La Paz, Bolivia
fzs1@o3-bolivia.org

En este capítulo estudiaremos algunas propiedades de la radiación que emite el Sol. La propiedad principal de la radiación es transmitir energía a distancia. Una vela logra alumbrar hasta una cierta distancia, un telecomando, emitiendo una radiación particular, logra encender o apagar un aparato eléctrico, un teléfono celular permite hacer llegar voz e imágenes a gran distancia, superando inclusive barreras de paredes, edificios y colinas.

4.1. Energía y radiación.

La radiación del Sol, al igual que la luz de la vela, pierde intensidad con la distancia. La ley de la conservación de la energía nos indica que, para fuentes puntuales o esféricas, la intensidad (definida como energía por unidad de área y de tiempo) disminuye inversamente al cuadrado de la distancia, curiosamente la misma ley que gobierna la fuerza de la gravitación universal (figura 4.1). De ese modo, un metro cuadrado de superficie del planeta Marte (que se encuentra a una distancia del Sol igual a 1.6 veces la de la Tierra al Sol) recibe una cantidad de energía por segundo 2.56 veces menor que un metro cuadrado de superficie de la Tierra. Es por esa misma razón que las estrellas más leja-

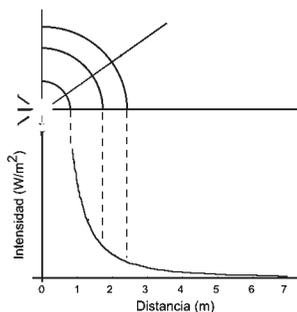


Figura 4.1. Representación gráfica de la ley de la inversa del cuadrado.

nas aparecen a nuestra vista más débiles que los modestos planetas que nos rodean, aunque en la realidad ellas sean iguales o más luminosas que el Sol.

4.2. Luz y colores.

La casi totalidad de la energía en la Tierra se origina en el Sol. En el interior de nuestra estrella, debido a las elevadas temperaturas (15 millones de grados K) y presión (24×10^{10} atm), se verifican reacciones nucleares que, al transformar el hidrógeno en helio, producen un exceso de energía bajo forma de radiación. Esa radiación, una vez que llega a la superficie, es irradiada isotrópicamente (o sea, en todas las direcciones) y alcanza también a la Tierra.

La radiación visible, o luz, se presenta a nuestra vista como una mezcla de colores, fácilmente reconocibles en un arco iris, en un prisma o en el reflejo de un disco compacto.

¿Qué diferencia un color de otro? Es una propiedad física de la naturaleza ondulatoria de la luz llamada “longitud de onda”, o sea la dimensión espacial de un ciclo de la onda, que suele indicarse con la letra griega lambda λ . Por tanto el color rojo corresponde a una longitud de onda mayor que el color amarillo y éste mayor que el azul (Lámina VII)

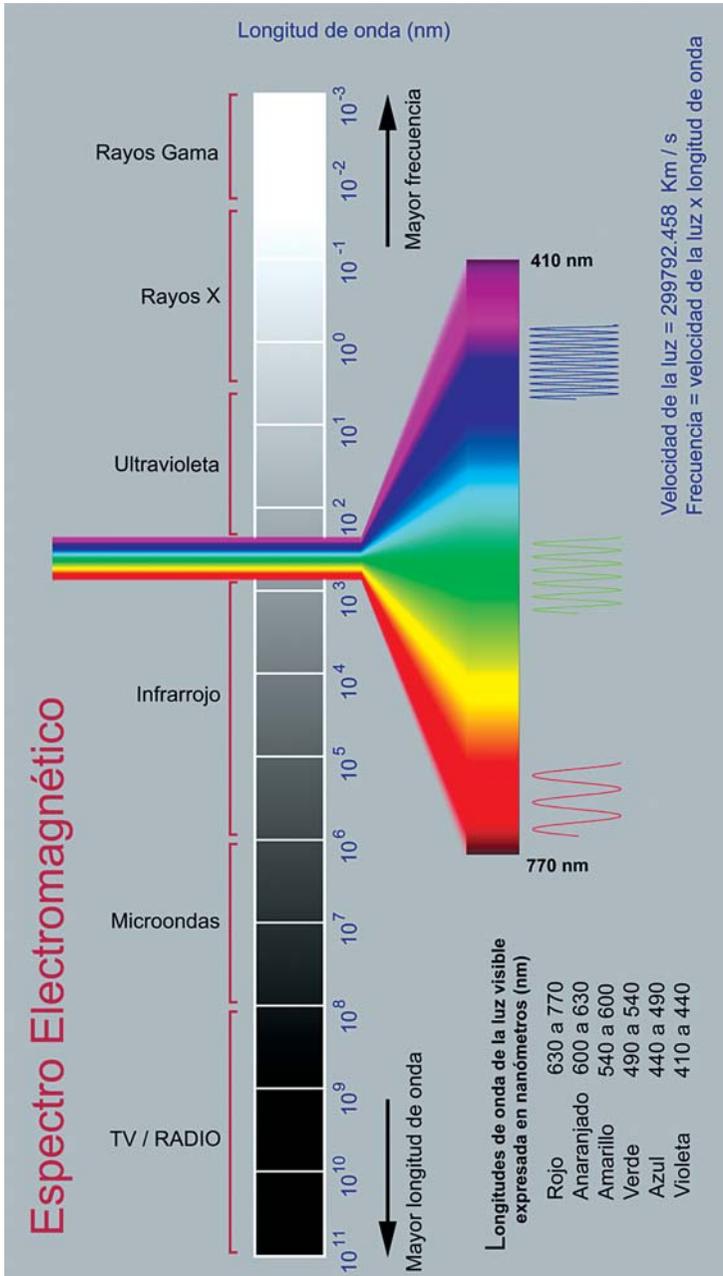
Las longitudes de onda de la luz son muy pequeñas: varían entre $\lambda = 0.4$ (azul) y $\lambda = 0.8$ (rojo) milésimas de milímetro, unidad que recibe el nombre de micra (μm). La longitud de onda de la radiación se mide también en “nanómetros”, siendo $1000 \text{ nm} = 1 \text{ micra}$: la banda de la luz visible va, por tanto, de 400 a 800 nm.

Siguiendo la representación de la Lámina VII en un milímetro entrarían 2500 ciclos espaciales de luz azul y 1250 veces la λ de luz roja.

Una manera alternativa de caracterizar una onda es mediante la frecuencia, que es el número de ciclos de la onda contenidos en un segundo. Se indica con la letra ν y se mide en Hz. Está asociada a la longitud de onda mediante la relación: $\lambda\nu = c$. La constante c es la velocidad de la luz, que en el vacío tiene el valor aproximado de 300 mil km/s. Por tanto la luz azul tiene una frecuencia de $7.5 \cdot 10^{14}$ Hz, el doble de la frecuencia de la luz roja.

Según la física moderna, la luz tiene una naturaleza “dual”: en ciertos fenómenos, como la difracción, se comporta como onda, mientras que en otros, como el transporte de energía, se comporta como si estuviera compuesta por gran número de

Lámina VII



Espectro electromagnético, donde se evidencia la relación entre color y longitud de onda.

partículas, llamadas fotones. Cada fotón transporta la cantidad de energía $h\nu$, donde la constante h que multiplica la frecuencia es llamada constante de Planck. Por tanto, resulta que cada fotón de frecuencia ν transporta la energía: $E = h \nu = hc/\lambda$. La energía total es, desde luego, el producto de la “cualidad” del fotón, más o menos energético, y del número de fotones que forman el haz de luz.

4.3 Radiación invisible.

El ojo humano evolucionó para ver la luz y distinguir sus diferentes longitudes de onda mediante los colores. Sin embargo hoy sabemos que toda fuente de calor emite radiación, visible e invisible. El ejemplo más común es el Sol.

A comienzo del siglo XIX el astrónomo, músico y desertor de la guardia real de Hannover, William Herschel, descubrió que además de la luz, nos llega del Sol una radiación invisible, de longitud de onda más larga que el color rojo. Según la costumbre de entonces de representar verticalmente los colores, esa radiación caía más abajo del rojo, razón por la cual recibió el nombre de *infrarrojo*. Hoy sabemos que está asociada con el transporte de energía térmica, o calor. Todos conocen los sensores capaces de detectar un cuerpo que emite calor, como el cuerpo humano: son los sensores de radiación infrarroja. Más importante es la capacidad de la Tierra de absorber luz visible y volver a emitir radiación infrarroja, proceso que es la base del efecto invernadero.

Poco después de Herschel, otro físico alemán, Johannes Ritter, descubrió que el Sol emite también radiación de longitud de onda más corta que el azul o el violeta. Esa banda de radiación que estaba representada más arriba del color violeta recibe el nombre de *radiación ultravioleta*. Esa región, que se extiende entre 0.1 micras y 0.4 micras, suele dividirse en tres bandas, conforme a los efectos que tienen sobre la vida:

- UV-A, que es la cercana a la radiación visible (320-400 nm): es responsable del bronceado de la piel;
- UV-B, llamada también biológica, varía entre 280 y 320 nm. A pesar de ser una banda muy estrecha, tiene una importancia fundamental para la vida. Dosis excesivas de UV-B pueden provocar daños a la piel, la vista y el sistema inmunológico, como se analizará en la Parte B de este libro. La mayor parte de esta radiación es atenuada por la capa de ozono.

- UV-C representa la banda más peligrosa para la vida y se extiende entre 100 hasta 280 nm. En efecto la vida evolucionó sin conocerla, ya que la UV-C es absorbida totalmente por la atmósfera. La UV-C se produce artificialmente en la industria de los germicidas y naturalmente en las estrellas. Por eso es necesario salir de la atmósfera terrestre y colocar telescopios en órbita para poder observar la radiación UV-C proveniente del cosmos.

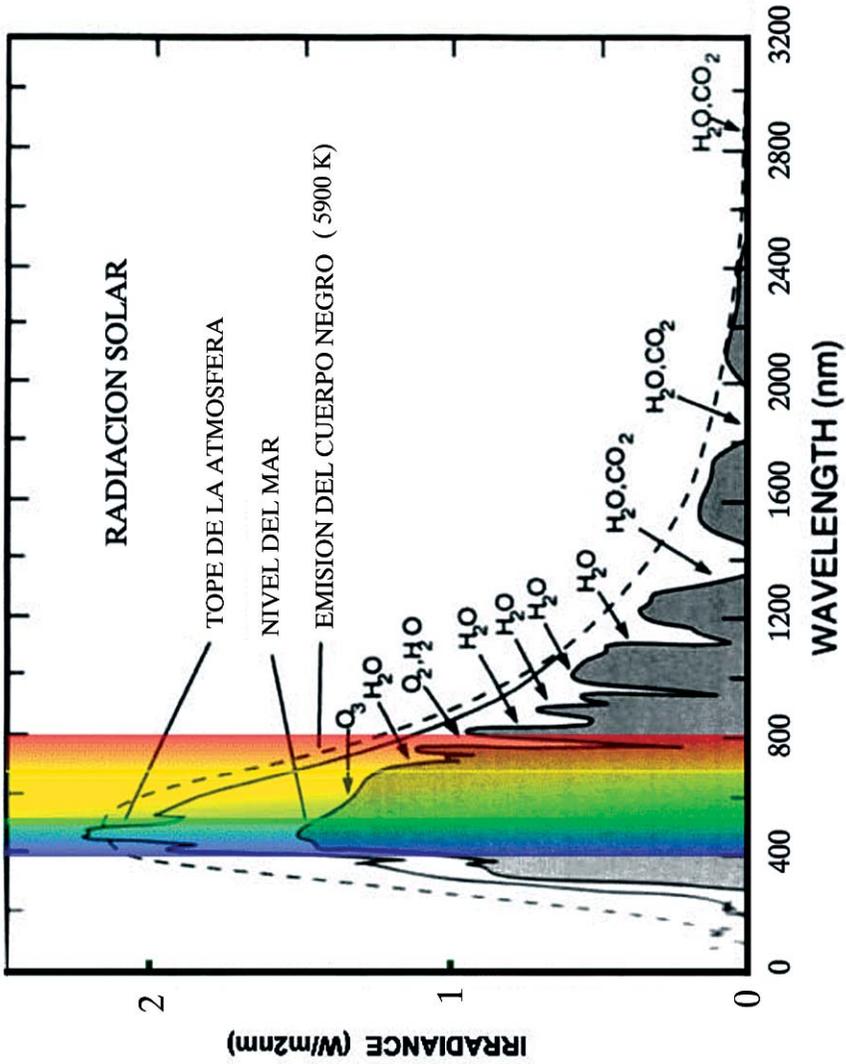
4.4. El espectro electromagnético del Sol y la contante solar.

La infrarroja y la ultravioleta no son las únicas bandas de radiación solar invisibles para nuestros ojos. En el transcurso del siglo XIX se descubrieron otras regiones de longitud de onda más cortas, llamadas rayos gamma (tan energéticos que son verdaderas partículas) y rayos X (los de las radiografías): ambas regiones reciben el nombre de radiación “ionizante” por la propiedad que tienen de remover electrones del átomo debido a su elevada energía. Asimismo existen bandas de longitud más larga que la infrarroja, como microondas (muy de moda en la cocina y en las telecomunicaciones) y ondas radio (TV y radioemisoras). Todas esas bandas son emitidas por el Sol (y por las demás estrellas), pero en cantidades diferentes. Ahora bien, el máximo de emisión de un cuerpo caliente se verifica a una longitud de onda que es función del inverso de la temperatura (ley de Wien): cuanto más caliente es la fuente emisora, más corta la longitud de onda del pico de radiación emitida. De hecho el color de las estrellas se debe a ese comportamiento. En el caso del Sol, la temperatura superficial es de 5800 K y la longitud de la máxima irradiación es $\lambda = 550$ nm, en la región verde. Sin embargo a nuestros ojos el Sol aparece más bien amarillo, debido a un concurso de fenómenos físicos y fisiológicos complejos.

La Lámina VIII muestra el espectro de emisión teórico a la temperatura del Sol, el real del Sol y el espectro que llega a la superficie de la Tierra después de cruzar la atmósfera. Nótese las “ventanas” en la luz visible y en parte de la UV y de IR, así como en algunas bandas de microondas (importantes para las transmisiones espaciales y televisivas por satélite).

Volviendo a la energía emitida por el Sol, es importante recordar que la energía recibida depende del inverso del cuadrado de la distancia. Aplicada a la Tierra, esa relación indica que la energía que llega al tope de la atmósfera, por unidad de tiempo y unidad de superficie (llamada **constante solar S_0**) es igual a $S_0 = S_s (R/d)^2$, donde S_s es la “constante solar” sobre la superficie del Sol y R y d son respectivamente el radio del Sol y la distancia Tierra-Sol. Se ha medido cuidadosamente S_0 y se ha hallado el valor 1370 W/m^2 . **La Tabla 4-1** muestra la contribución de las prin-

Lámina VIII



Espectro de emisión del Sol, sobrepuesto al espectro teórico (cuerpo negro) y al espectro recibido en la superficie de la Tierra, después que la radiación cruce la atmósfera e interactúe con ésta.

cipales bandas del espectro solar a la constante solar fuera de la atmósfera y al llegar a la superficie. La diferencia se debe a que, al cruzar la atmósfera, la radiación solar interactúa con las moléculas de los gases que componen la atmósfera, principalmente oxígeno, nitrógeno, ozono y aerosoles (ver cap. 1), y es en parte absorbida, en parte dispersada, dependiendo de la longitud de onda y de la naturaleza de las moléculas. Si bien la luz visible es poco alterada, la radiación ultravioleta sufre procesos de dispersión y de absorción principalmente por el ozono de mucha importancia.

Tabla 4-1
Contribución de las diferentes bandas espectrales a la constante solar

Banda de radiación solar	Constante solar (W/m²)	% fuera de la atmósfera	% a nivel del mar	% relativo de la banda UV
UV-C (100-280 nm)	6.4	0.5	0	0
UV-B (280-315 nm)	21.1	1.5	0.25	5
UV-A (315-400 nm)	85.7	6.3	4.75	95
Total RUV	113.2	8.3	5	100
Luz + IR	1.253.6	91.7	95	
Total RUV+LUZ+IR	1.367	100	100	

4.5. ¿De qué depende la radiación ultravioleta en la Tierra?

Restringiendo nuestra atención a la componente biológicamente activa de la radiación ultravioleta (UV-B), queremos comentar su dependencia de los factores ambientales.

La magnitud más significativa es la **intensidad** de la radiación que se define como la cantidad de energía que impacta por unidad de tiempo en una superficie unitaria dispuesta horizontalmente. La intensidad se mide en vatios por metros cuadrados (W/m²).

Sabemos bien que la intensidad de la radiación ultravioleta en la superficie de la Tierra no es la misma en lugares diferentes, en diferentes meses del año y a diferentes horas del día. Asimismo ella varía si el día es soleado o nublado, si la atmósfera es limpia o contaminada, si estamos en un lugar con horizonte abierto o si estamos

rodeados de cerros, si estamos en la nieve o en un prado verde. Desde luego, no todos esos factores afectan por igual la intensidad de la UVB, de modo que es útil repasar su importancia y alcance.

a) **El ángulo cenital solar.**

El factor más importante que determina la intensidad de la UV-B es sin duda la inclinación de los rayos solares, medida mediante el “ángulo cenital solar” (SZA): es el ángulo que forma el Sol con respecto a la dirección vertical. El SZA determina cuánta energía golpea una superficie unitaria horizontal: para SZA pequeños los rayos caen casi verticales y mucha energía llega a la superficie unitaria, mientras para bajas alturas del Sol (grandes SZA) la misma energía anterior se reparte sobre una superficie más grande. Ahora bien ¿dónde y cuándo se tienen menores SZA?. En primer lugar en la zona tropical: entre los dos trópicos el Sol pasa dos veces al año por el cenit (SZA=0) y, en general, los SZA son menores que a latitudes intermedias. Por ejemplo en La Paz (16.5°S) el Sol pasa por el cenit a comienzo de noviembre y vuelve a pasar a comienzo de febrero. Por tanto la intensidad de la UV-B depende de la latitud (Lámina IXa).

En segundo lugar, a una latitud fija, la intensidad de la UV-B depende de la estación del año: generalmente en verano el sol es más alto que en invierno. Por tanto en verano la UV-B es más intensa que en invierno.

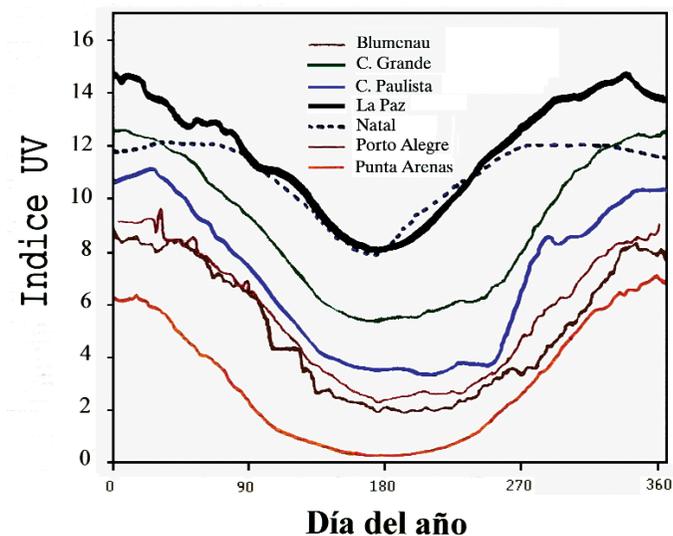
Asimismo, en un mismo lugar y en una misma época del año, la UV-B depende de la hora del día: cerca del mediodía (astronómico antes que legal) el Sol está más alto en el cielo que a otras horas del día. No es de extrañar entonces que las horas más peligrosas para exponerse al Sol estén en torno al mediodía. De hecho la intensidad de la UV-B en las tres horas centrales del día alcanza al 50% de la intensidad de todo el día (figura 4.2)

b) **La capa de ozono.**

Ya hemos mencionado la importancia de la capa de ozono para absorber la UV-B. Ahora bien la capa de ozono cambia, a su vez, con la latitud, con la época del año y condiciones meteorológicas sinópticas.

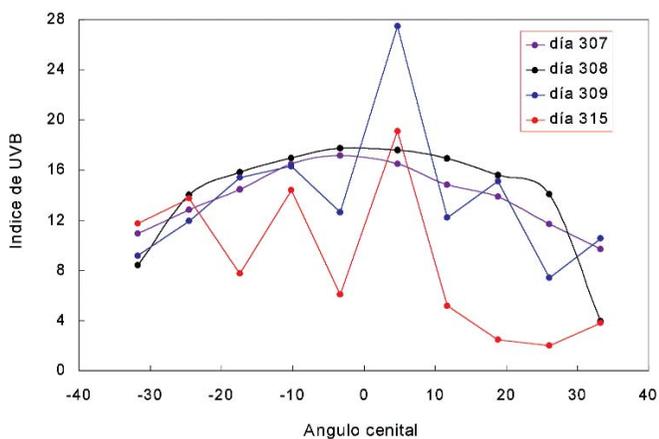
Se estima que una disminución de 10% de la capa de ozono puede tener como consecuencia un incremento de hasta 20% de la UV-B, en especial de ciertas longitudes de onda muy peligrosas para la salud. Por esa razón es importante monitorear constantemente la capa de ozono. La figura 4.3 muestra la “anticorrelación” entre ozono y UVB registrada en días soleados del mes de diciembre de 2002. Anticorrelación significa que cuando se incrementa el ozono disminuye la intensidad de la RUV, y viceversa.

Lámina IXa



Dependencia de la radiación ultravioleta (medida por el Índice de UVB) de la latitud para diferentes estaciones de la Red Sudamericana del INPE-Brasil. Nótese la anomalía de La Paz: a pesar de estar a mayor latitud que Natal, La Paz muestra valores mayores de UVB, debido a la mayor altura sobre el nivel del mar.

Lámina IXb



Efecto de nubes en 4 días cercanos. Valores más elevados (picos) de UVB se observan en días seminublados, pero las dosis mayores corresponden a días soleados.

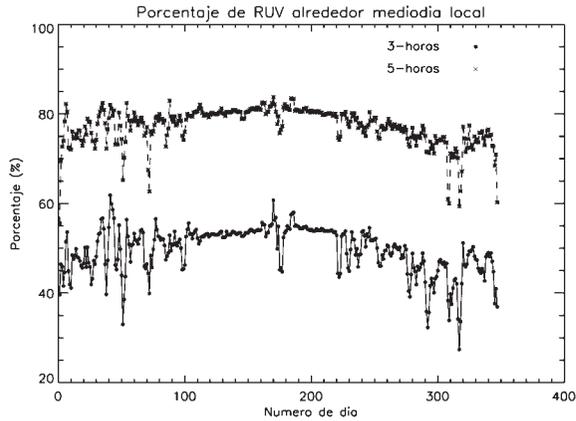


Figura 4.2. Se muestra el porcentaje de la dosis diaria eritémica que corresponde, respectivamente a 3 y 5 horas centrales del día. Se aprecia que en esos horarios se recibe, respectivamente, 50% y 80% de la dosis diaria. Los datos corresponden al año 1998.

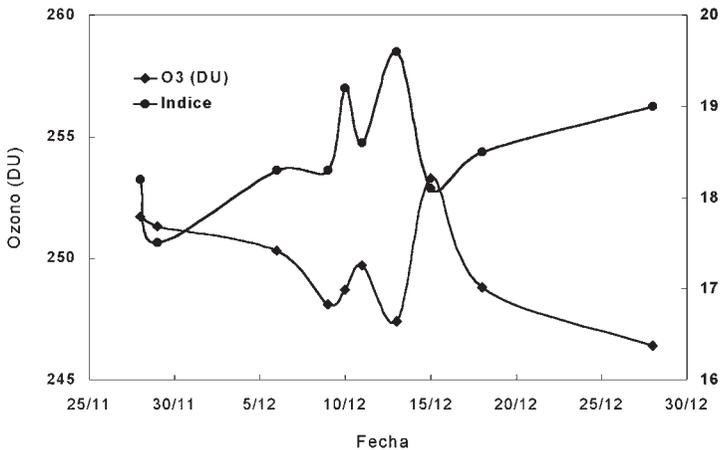


Figura 4.3. Anticorrelación entre ozono e índice de UVB, para días despejados del mes de diciembre de 2002: los días en que la columna de ozono crece el IUV disminuye y viceversa.

c) Las nubes.

Las nubes que se interponen entre el Sol y la superficie de la Tierra tienen el efecto de atenuar la radiación, efecto difícil de cuantificar debido a la complejidad física y geométrica de las nubes. Aunque el efecto global es menor que en el caso de la luz, en general cuando una nube oscurece al Sol la UV-B dis-

minuye sensiblemente. El comportamiento diferente con respecto a la luz se explica debido a que casi 50% de la radiación ultravioleta que llega a la superficie es difusa, es decir, llega de todo lado del cielo, mientras la luz es mucho más direccional. Una consecuencia de este hecho son las quemaduras que se sufren aun estando a la sombra: es la radiación UV difusa la que produce el daño.

Cuando las nubes no oscurecen al Sol se pueden producir condiciones por las cuales la UV-B no sólo no es atenuada sino que es reforzada por el efecto especular que ejercen las nubes sobre la radiación reflejada por la superficie. Por esa razón es usual tener picos más elevados de UV-B, pero de corta duración, en días parcialmente nublados que en días claros. La Lámina IXb, ilustra estos resultados.

d) La altura

La dependencia de la UV-B con la altura se debe a dos efectos: reducción de la atmósfera (menos dispersores de la radiación) y reducción del contenido de ozono. Sin embargo intervienen críticamente otros factores, como el cambio en el albedo (porcentaje de energía reflejada por la superficie terrestre), la altura efectiva a la cual se mide la UV-B, la disminución del contenido de aerosoles y el ángulo cenital, factores que afectan diversamente las diferentes longitudes de onda. Se entiende entonces que no exista un valor único para el incremento porcentual de la UV-B con la altura, habiéndose obtenido valores que varían entre 5% y 50 % por km para el incremento de la UV-B eritémica (o sea la UV-B medida con referencia al daño que produce en la piel, ver el siguiente capítulo). Medidas realizadas en Bolivia, entre La Paz (3420 m snm) y Chacaltaya (5300 m snm) muestran un incremento de 7% por km para UV-B eritémica (Zaratti, 2002 y referencias citadas en ese artículo).

e) El albedo

El albedo es la propiedad reflejante de una superficie. Es experiencia común que la nieve refleja mucho más la radiación (visible y UV-B) que la hierba. Ahora bien, a mayor albedo mayor será la intensidad de la UV-B que recibe el cuerpo humano: esto explica por qué es fácil broncearse y quemarse en la nieve en días soleados. Un factor importante para la determinación del efecto del albedo sobre la intensidad de la UV es la geografía y composición del suelo a varios kilómetros a la redonda, hecho que vuelve compleja la tarea de determinar el albedo con carácter general. De todos modos, a continuación presentamos una tabla con valores referenciales del albedo (**Tabla 4-2**)

Tabla 4-2
Albedo de algunas superficies materiales

Tipo de superficie	Albedo	Ubicación
Asfalto, vegetación, concreto	0.09	Principales ciudades de los continentes
Vegetación y piedras	0.04	Montañas
Agua	0.07	Mares y lagos
Agua, asfalto, concreto, vegetación	0.08	Ciudades costeras
Agua, vegetación y piedras	0.06	Ciudades costeras no urbanas
Nieve fresca	0.89	Montañas en tiempo de invierno
Nieve escarchada	0.59	Montañas en tiempo de verano

f) Aerosoles

Se entiende por aerosoles partículas suspendidas en la atmósfera, como polvo levantado por el viento o cenizas y humo provenientes de la quema de cobertura vegetal. Existen aerosoles que absorben la UV-B y aquellos que la reflejan. Su alta variabilidad, espacial y temporal, hace difícil cuantificar el efecto neto sobre determinada localidad.

g) Órbita terrestre

Sabemos que la Tierra describe una órbita elíptica en torno al Sol. Resulta que en verano (austral) la Tierra está más cerca al Sol que en invierno. Se ha estimado que esa pequeña diferencia de distancia hace que en el hemisferio sur en verano la radiación solar sea 7% mayor que la correspondiente al hemisferio norte en verano. ¡Otra ganga por vivir en el hemisferio sur!

h) Dependencia bajo el agua

La dependencia de UV-B con la profundidad del agua es importante para los efectos sobre sistemas acuáticos: plancton y algas. En general, el agua atenúa a la UV-B más que a la luz, y más para longitudes de onda cortas, a tal punto que cerca de la costa la UV-B se extingue para profundidades de 20 metros, debido a las peculiares propiedades bio-ópticas de esas aguas, aunque en aguas claras oceánicas se ha podido detectar efectos de la UV-B hasta 30 metros de profundidad.

4.6. La RUV en Bolivia: valores y tendencias.

Con base a más de seis años de medidas continuas de la radiación ultravioleta y la capa de ozono en Bolivia, mostramos a continuación, algunos resultados que caracterizan la RUV en La Paz y, en general, en Bolivia. En lo que sigue nos referiremos a los valores máximos (intensidad de la radiación “eritémica”), que se mide en mW/m^2 o mediante el Índice de RUV (IUV), como a los valores acumulados (dosis de la UV-B eritémica).

La figura 4.4 muestra el comportamiento diario de la UV-B en dos días soleados, de abril y octubre. Se observa que en octubre (cerca al paso del sol por el cenit) se tienen máximos más elevados debido al menor ángulo cenital (SZA). Asimismo el máximo de la UV-B se obtiene en torno a las 12:30, que corresponde al mediodía local de La Paz (longitud 68.1W). La forma de la curva confirma, además, que las tres horas centrales del día (de 11 a 14) se recibe más del 50% de la dosis de todo el día, algo que hay que tener en mente a la hora de tomar un baño de sol.

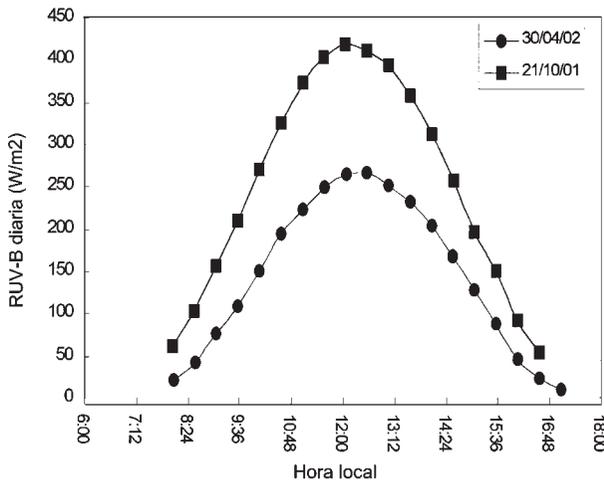


Figura 4.4. Comparación de la intensidad de la UVB en dos días soleados de abril y octubre. Nótese que la misma irradiancia, que a fines de abril se recibe a las 12.30 como máxima, en cambio se recibe en octubre a las 9.30, fuera del horario crítico de exposición.

La figura 4.5 muestra los valores promedio mensual de las dosis de UV-B a lo largo de 6 años. Se confirma que los meses de mayor irradiancia son los que están entre los dos pasos del Sol por el cenit: noviembre, diciembre y enero. Comparando con otros lugares del planeta, podemos afirmar que nuestros valores están entre los más elevados del mundo, un récord poco envidiable, dados los riesgos que conlleva una elevada intensidad de la radiación ultravioleta.

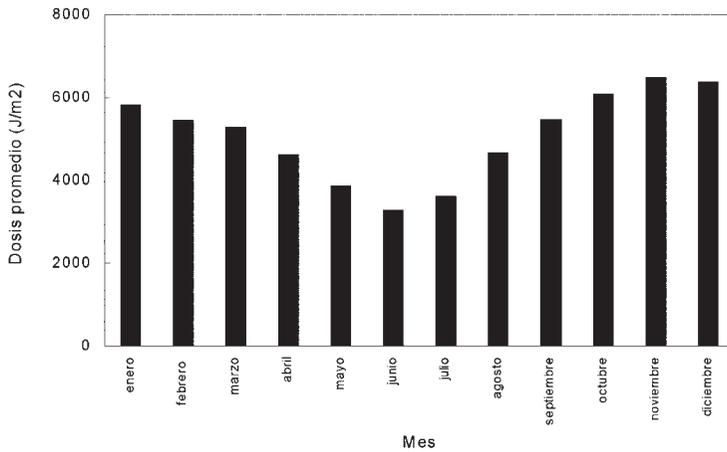


Figura 4.5. Ciclo anual de las dosis promedio mensuales de UVB en La Paz. Los meses de máxima insolaración a la UV-B resultan ser, como se esperaría, los meses de verano, entre los dos pasos del Sol por el cenit de la localidad: noviembre, diciembre y enero.

Finalmente la figura 4.6 muestra el comportamiento anual del índice de UV-B en La Paz en los últimos seis años. Es posible distinguir el efecto providencial que tiene el clima del verano en Bolivia (nublado y lluvioso) para mantener la intensidad de la radiación ultravioleta en límites compatibles con el desarrollo de la vida vegetal y animal en altura.

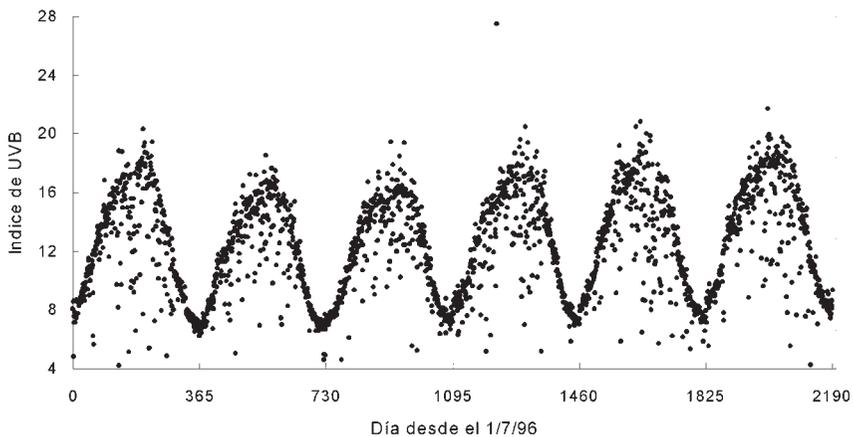


Figura 4.6. Serie temporal del índice de UVB en La Paz a lo largo de seis años. Además del comportamiento cíclico estacional, es posible observar la diferente climatología que se presenta entre un año y otro. Por ejemplo, la menor dispersión de puntos pone en luz que el verano 2001-2002 (último ciclo) fue, según el gráfico, menos nublado que el año anterior.

BIBLIOGRAFÍA CONSULTADA CAPÍTULO 4

1. Forno, R.; Andrade, M. ed. Naturaleza y efectos de la radicación ultravioleta y la capa de ozono. s.l.: Instituto de Investigaciones Físicas, (1997).
2. Iqbal, M. An introduction to solar radiation. sl.: Academic Press, (1983).
3. Zaratti, F; Forno, R.; Garcia, J.; Andrade, M. Erythemally weighted UV-B variations at two high altitude locations. s.l.: Journal Geophysical Research, Vol. 108, No. D9, 4263, (2003).

PARTE B

**EFFECTOS DE LA RADIACIÓN
ULTRAVIOLETA**

LA RADIACIÓN ULTRAVIOLETA Y LA PIEL

Félix Rollano G.

Profesor de Dermatología
Facultad de Medicina UMSA
felixrollanog@hotmail.com

5.1. Introducción.

La piel es un órgano complejo que cubre al cuerpo humano, sabiamente estructurado para protegerlo de agresiones externas de todo tipo, traumáticas, químicas o físicas. En particular, posee una serie de mecanismos de defensa que nos salvaguardan ante la acción nociva de los rayos solares.

Estos mecanismos de defensa de la piel son físicos, bioquímicos, biológicos e inmunológicos bien estructurados. A continuación describimos los principales mecanismos.

5.1.1. La melanina: sintetizada por los melanocitos, es la principal barrera defensiva que evita que la piel sufra quemaduras por la radiación solar. Los melanocitos son células responsables del color de la piel y son estimulados por la Radiación Ultravioleta (RUV). La melanina tiene la función de neutralizar los efectos de los radicales libres liberados por las células que han sufrido daño por efecto de la radiación solar.

En nuestro medio, la mayoría de la población presenta dos tipos de piel; la denominada constitutiva que es la piel natural cubierta de los RUV y la facultativa como se la llama a la piel expuesta y que adquiere un tinte bronceado. La presencia de melanina en la piel puede ser natural, sin un estímulo previo, o puede elaborarse tras la exposición solar en forma aguda o crónica. Esta capacidad de síntesis de la melanina está determinada genéticamente y es un factor racial, con variaciones entre las personas de una misma raza.

En función de la capacidad de síntesis de la melanina, se define 6 tipos de pieles de acuerdo a la escala de fototipos humanos de Parrish. La piel blanca (tipo I y II) es la más vulnerable a los efectos nocivos de la RUV. De tal manera que la melanina es el factor más importante de protección frente a las quemaduras solares. Sin embargo este factor de protección se encuentra vulnerado por la RUV en las exposiciones a mediano y largo plazo; por consiguiente el color moreno de la piel sólo protege de las quemaduras pero no garantiza una protección absoluta a la radiación solar a largo plazo.

5.1.2. La sudoración: se produce por la estimulación a las glándulas sudoríparas que se encuentran ampliamente diseminadas en la piel, y responde a un estímulo de calor provocado por los rayos solares. El sudor contiene ácido uránico, el cual actúa como un protector solar absorbiendo las RUV.

5.1.3. La capa cornea: es la capa más superficial de la piel (capa inerte) engrosada. Está inducida por la RUV, evita la penetración de la RUV a las capas profundas de los queratinocitos (capas vivas). La capacidad de penetración de la RUV está directamente relacionada con la longitud de onda (Lámina Xa). La RUV-B, que tiene fotones de menor longitud de onda que la RUV-A, tiene efectos más dañinos por su escasa capacidad de penetración al espesor de la epidermis. Por consiguiente, la profundidad de penetración de los fotones está en proporción directa con su longitud de onda. Los RUV-A son más pigmentogénicos que los RUV-B por que estimulan a los melanocitos, pero menos que los fotones de la luz visible

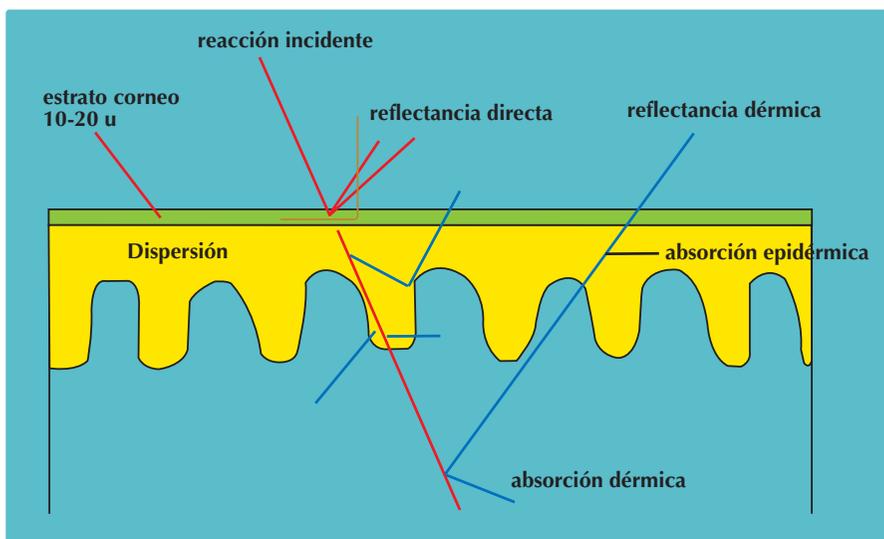
5.1.4. La defensa inmune es específica e involucra a la epidermis por dos mecanismos.

- a.- Células inmunocompetentes: células de Langerhans y queratinocitos.
- b.- Citoquinas: agentes solubles segregados por las células

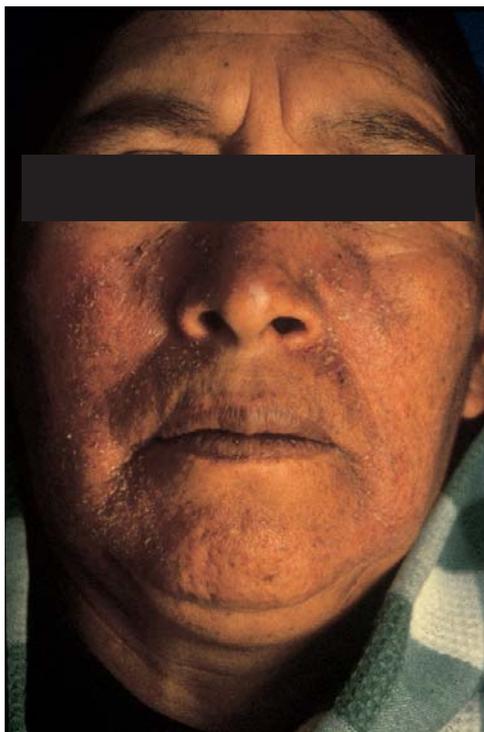
En la dermis también intervienen otras células como las polinucleares, células endoteliales, mastocitos, linfocitos, fibroblastos, etc.

Las células de Langerhans son las que intervienen directamente en las reacciones inmunológicas y se ubican en el espesor de la epidermis. Se caracterizan por su núcleo lobulado y por sus prolongaciones dendríticas. Por el efecto de la RUV son anuladas o disminuidas en su capacidad inmunológica.

Los queratinocitos son las primeras células que entran en contacto con el ambiente y, por tanto, tienen un papel importante en la defensa inmune. Producen citoquinas, factor de crecimiento, mediadores solubles que pueden actuar de manera autócrita sobre ellos mismos o sobre las células circundantes.



Láminas X a (arriba) y b (abajo)



En resumen, la piel está protegida contra ataques externos, incluyendo la RUV, por un sistema activo de defensa inmune. Las células de Langerhans son claves en este sistema de la epidermis en asociación con los queratinocitos. Durante el envejecimiento y especialmente en el fotoenvejecimiento, este sistema se deteriora, lo que provoca una aceleración del fotoenvejecimiento y una escasa resistencia a las transformaciones malignas de las células epiteliales.

5.2. Efectos negativos de la radiación solar sobre la piel.

El sol es imprescindible para la vida, y tiene efectos beneficiosos para el organismo. En el ser humano participa en el metabolismo de las vitaminas A y D, contribuyendo a la formación y consolidación de los huesos y dientes.

La exposición a la luz solar voluntaria o involuntaria en exceso puede ser dañina para la piel de los humanos. Con frecuencia la gente olvida o ignora el peligro al que se enfrenta cuando se expone a fuentes de energía tan intensas como son los rayos solares.

La Organización Mundial de la Salud recuerda que la exposición excesiva a la radiación solar ejerce un efecto negativo para la salud, principalmente vinculado con el envejecimiento prematuro de la piel, con diversos tipos de cáncer, cataratas, afecciones oculares y numerosas enfermedades denominadas Fotodermatosis.

Los efectos negativos a la exposición de la RUV son de dos tipos:

5.2.1. Efectos negativos inmediatos:

- *Quemadura solar:* Se produce a las pocas horas de una exposición solar aguda y tiene su máxima intensidad entre 12 y 24 horas después de la exposición. Se caracteriza por un eritema o enrojecimiento de la piel expuesta. Cuando la exposición es prolongada y persistente, las lesiones son intensas, incluso se pueden presentar en el paciente quemaduras más profundas con inflamación, edema y vesículas. La presencia de eritemas está en directa relación a exposiciones previas y al tipo de piel. El 10 % de la RUV-B puede penetrar hasta la unión dermoepidérmica en una exposición prolongada y ser responsable de la quemadura solar. La RUV-A también participa en este proceso, pero a partir de intensidades mayores de la radiación.
- *Bronceado:* La condición previa para el bronceado es el tipo de piel; solamente la piel oscura tipo IV y, ocasionalmente, el tipo III, pueden adquirir un ma-

yor oscurecimiento de la piel denominado bronceado. Este puede presentarse inmediatamente tras la exposición solar sin previo eritema, o hacerse evidente a los 3 días, después de una nueva síntesis de melanina por los melanocitos. En el bronceado participa principalmente la RUV-A, al igual que sucede en las lámparas de bronceado artificial.

Es posible pensar que la piel morena sea resistente a los efectos nocivos del sol, pero el bronceado sólo nos protege de la quemadura solar, no así de los efectos tardíos por exposición crónica como el envejecimiento cutáneo, el cáncer de piel y otros efectos. La melanina protege de los efectos de la RUV-B pero no de la RUV-A que llega hasta la capas profundas de la piel incluso a la dermis. Estas alteraciones se presentan a lo largo del tiempo en aquellos individuos expuestos excesivamente al sol por razones ocupacionales, profesionales o por amor al sol.

- *Alteración del sistema inmunitario:* En las zonas expuestas, la radiación ultravioleta afecta a las células inmunocompetentes; las células de Langerhans se encuentran disminuidas con una sensibilidad a los antígenos, deprimida fundamentalmente por la RUV-B. El daño a los queratinocitos se traduce por la disminución de las citoquinas.

5.2.2. Efectos negativos a largo plazo

La exposición prolongada a la RUV en forma constante o intermitente ocasiona alteraciones cutáneas que se caracterizan por su cronicidad, entre las que se encuentran principalmente: el fotoenvejecimiento, las fotoalergias, las denominadas fotodermatitis idiopáticas y el cáncer de piel, y, como un capítulo especial, las fotoagravadas, donde los rayos solares exacerban o agravan un cuadro clínico ya existente.

5.3. Fotoenvejecimiento:

La RUV-A junto con algunos factores externos provoca la formación de radicales libres con gran capacidad oxidante que dañan las células epidérmicas y el colágeno provocando un envejecimiento prematuro de la piel.

Clínicamente se observa en las zonas expuestas áreas donde la piel pierde su elasticidad, se hace áspera, presenta arrugas y cambio de color, pero fundamentalmente se evidencia en las denominadas “patas de gallo”, donde los pliegues naturales son más profundos. El estudio microscópico de la piel demuestra cambios impor-

tantes en las fibras elásticas, como la degeneración de sus haces y la formación de cúmulos basofilos; la epidermis sufre zonas de atrofia y acantosis, la pigmentación en la capa basal es irregular y en la dermis papilar los vasos están dilatados.

Desde el punto de vista fotobiológico se ha demostrado que dosis moderadas de RUV-B, asociadas a altas dosis de RUV-A, producen mayor elastosis que por separado.

5.4. Reacciones fotoalérgicas y fototóxicas.

Se producen cuando la RUV es capaz de provocar fenómenos inmunológicos. Se señala en estos casos que es necesaria la absorción de la radiación por las células que sufren cambios moleculares y tal vez que se produzcan sustancias antigénicas capaces de desencadenar los fenómenos de sensibilidad celular.

En el caso de las sustancias fototóxicas el daño es directo, sin la intervención de fenómenos inmunológicos.

En la fotoalergia las lesiones se caracterizan por ser crónicas y por un polimorfismo de lesiones, eczematosas, papulares, urticarianas o de un prúrigo solar y, además, por reacción a determinadas drogas.

En cambio las lesiones fototóxicas son agudas y caracterizadas principalmente por edema y eritema que se presentan a los pocos minutos u horas después de la exposición al sol. Posteriormente se presenta hiperpigmentación y descamación tal como ocurre en la quemadura solar o a la exposición a drogas.

5.5. Fotodermatosis.

No existe una clasificación de las Fotodermatosis que pueda satisfacer a todos los autores. Corrales Padilla en una monografía encomendada por el **CILAD**, denominada Enfermedades por fotosensibilidad, las clasifica en 5 categorías: 1-Genéticas y Metabólicas. 2- Fototóxicas y Fotoalérgicas. 3- Degenerativas y neoplásicas. 4- Idiopáticas y 5- Fotoagravadas.

En la actualidad las Fotodermatosis se dividen en:

- 1- Fotosensibilidad a drogas y sustancias químicas.
- 2- Alteraciones en la reparación del DNA.

- 3- Lesiones exacerbadas por la RUV.
- 4- Fotodermatosis idiopáticas. Estas últimas incluyen: la Erupción lumínica polimorfa, Prurigo actínico, Hidroa vacuniforme, Dermatitis actínica crónica con 3 subgrupos (Dermatitis por fotosensibilidad, Reticuloide actínico y Reacción lumínica persistente)
- 5- Urticaria solar.

Por las características propias de las RUV en nuestro medio nos referiremos a las Fotodermatosis que se han convertido en un problema de salud en nuestro país. por su incidencia y por la dificultades terapéuticas

5.5.1. Fotodermatosis idiopáticas.

a) erupción polimorfa solar.

Es denominada también dermatitis polimorfa solar, dermatitis actínica, eczema solar, etc. Es la más frecuente en nuestro medio, donde es posible observar desde lesiones discretas, como un eczema, hasta lesiones muy agravadas lindantes con el reticuloide actínico. Para algunos autores el prurigo solar, la erupción polimorfa solar y el reticuloide actínico resultan ser el mismo cuadro en diferentes periodos de evolución.

Es frecuente en los habitantes del altiplano, en su mayoría originarios; se observa con menor frecuencia en mestizos y, ocasionalmente, en blancos muy expuestos a la RUV. Se estima que estas lesiones son agravadas por la exposición a la luz blanca de neón y por el brillo de las pantallas de televisión.

Clínicamente, las lesiones son polimorfas (Lámina Xb), presentan eritemas, escamas, eczemas, excoriaciones, liquenificaciones e impetiginización secundaria al rascado ocasionadas por el intenso prurito que acompaña este cuadro. Las lesiones se ubican en las zonas expuestas con mayor frecuencia: el dorso de la nariz, mejillas, región frontal, V del escote, cuello lateral y posterior, pabellones auriculares, dorso de manos y antebrazos. Las lesiones se detienen nítidamente en el borde de la piel cubierta. Dependiendo de los hábitos de vestir, en las mujeres se pueden observar estas lesiones en las piernas y dorso de los pies. Existen zonas de la cara que son menos sensibles como los párpados superiores, pliegues nasogenianos, región subnasal y submentoniana.

Con frecuencia se acompaña de queilitis actínica caracterizada por lesionar el labio inferior ocasionando eritema, escama y fisuras con pigmentaciones residuales. En algunas ocasiones es la primera manifestación de una fotodermatosis sin lesiones cutáneas. De igual manera, se puede observar lesiones conjuntivales caracterizadas por una hiperemia conjuntival que evoluciona a una hiperpigmentación característica y posterior evolución a lesiones exuberantes pseudo-pteriginosas, denominadas Conjuntivitis exuberante pigmentosa, descritas en nuestro medio.

Desde el punto de vista fotobiológico existe una sensibilidad a la RUV-B. El tratamiento es sintomático con el empleo de antihistamínicos y corticoide tópicos. El caroteno, talidomina y cloroquinas tienen efectos variables; la fotoprotección es importante.

b) prurigo actínico.

Conocido como prurigo solar, prurigo de la altiplanicie, prurigo actínico familiar, este último por haber sido descrito en numerosos grupos familiares de nativos en Canadá, USA y Colombia. En estos casos se ha descrito una relación con antígenos de histocompatibilidad A24 y Cw4.

Clínicamente se caracteriza por pápulas escoriadas (Lámina XIa) producto de intenso prurito que acompaña a las lesiones. Afecta zonas expuestas, principalmente la cara, antebrazos y dorso de manos. Se acompaña de zonas eczematosas, liquenificadas en especial en la cara, además de queilitis actínica, conjuntivitis exuberante pigmentosa y alopecia traumática de la cola de las cejas.

El tratamiento, al igual que todas las fotodermatosis, está dirigido a la fotoprotección y medidas para superar el prurito y la inflamación.

c) dermatitis actínica crónica.

De este grupo de enfermedades el más importante es el reticuloide actínico que es la forma clínica más severa de las fotodermatosis idiopáticas.

Los hombres de edad adulta son los más afectados. El inicio puede ser en forma de una erupción polimorfa solar que evoluciona a placas eritemavioláceas, escamosas, infiltradas y liquenificadas en las zonas expuestas de la piel. Los pliegues de la cara se encuentran muy acentuados y liquenificados, adquiriendo el paciente una "facies leonina" (Lámina XIb) o de piel con envejecimiento exagerado. Se puede observar pápulas liquenoides y queratóticas, nódulos,

áreas de discromía y una extensión eritrodérmica. Frecuentemente se acompaña de queilitis actínica, alopecia de la cola de las cejas y conjuntivitis exuberante pigmentosa.

En numerosos casos se ha descrito una asociación con eritrocitemia de la altura. No se presenta una degeneración maligna de las lesiones ni compromiso sistémico.

El rango fotobiológico comprendido en estas lesiones está entre 300 y 700 nm, con mayor intensidad entre 330 y 400 nm (UV-A).

Existen numerosas hipótesis para explicar esta forma clínica, como la fotoalergia, alteraciones del metabolismo del triptófano y alteraciones de los mecanismos de la vigilancia inmunológica por la irradiación solar. La hipótesis actual es una reacción de hipersensibilidad retardada debida quizás a un alérgeno cutáneo endógeno fotoestimulado; se postula que el receptor podría ser el DNA o una molécula parecida o asociada.

El tratamiento es un desafío terapéutico por los escasos resultados obtenidos, poco curativos. La fotoprotección debe ser casi absoluta. Puede existir una mejoría en pacientes internados. La terapéutica sintomática se basa en el empleo de antipalúdicos orales, antihistamínicos y corticoides tópicos. Se ha ensayado inmunosupresores y desensibilización a la RUV por medio de puvaterapia a dosis crecientes.

5.5.2 Urticaria solar.

Es un cuadro clínico inusual inducido por la RUV y la luz visible. Afecta de igual manera las zonas expuestas. Se conocen dos formas: primaria o espontánea que es la más común y la secundaria o fotosensibilización a drogas o sustancias químicas. La forma primaria afecta a mujeres de 10 a 50 años, la erupción se presenta entre los 5 a 10 minutos después de la exposición solar. En la mayoría de los casos cede entre la primera y segunda hora de evolución. Clínicamente se inicia con un sensación de hormigueo, posteriormente se presenta un eritema en parche y luego ronchas aisladas o confluentes. Asimismo se puede asociar con cefaleas, náuseas, broncoespasmo o lipotimia.

La conducta terapéutica consiste en fotoprotección y antihistamínicos no sedantes. En casos resistentes está indicada la puvaterapia, la plasmaferesis. Sin embargo, algunos pacientes no responden a ningún tratamiento.



Láminas XI a (arriba) y b (abajo)



5.5.3. Cáncer cutáneo.

El cáncer cutáneo se caracteriza en general por la alteración de la reparación de DNA (cancerogénesis) por el efecto de la RUV-B que, combinada con RUV-A, es mucho más cancerígena que por separado: estas radiaciones posiblemente sean el factor más importante en la génesis del carcinoma basocelular, epidermoide, queratoacantoma, queratosis actínica y melanoma maligno.

Existen numerosas teorías que pretenden explicar el mecanismo por el cual la exposición a la RUV determina un cáncer :

- *Mutagénico*: que altera la estructura helicoidal del DNA en las células epidérmicas. La alteración cromosómica se observa en el Gen P53 y en la pérdida de los alelos en el cromosoma; estas células tienen dificultad en la reparación del DNA y originan una estirpe oncológica en la siguiente célula.
- La formación de *radicales libres* como los dímeros de la pirimidina en el DNA.
- *Alteraciones en la inmunidad*: no sólo tienen un efecto directo iniciador, sino que tendrían una función promotora del tumor al interferir en la inmunidad celular.

La RUV tiene una acción importante sobre los melanocitos, actúa como promotor de lesiones melánicas, como los nevos displásicos o atípicos, incrementando el número de melanocitos en la piel expuesta y no expuesta, además tiene una participación como carcinógeno en los melanocitos, ocasionando la transformación de lesiones previas o la aparición de lesiones pigmentadas malignas.

La exposición crónica y prolongada sería la responsable de los carcinomas basocelulares y del melanoma maligno, en cambio la causa del carcinoma epidermoide es la exposición aguda e intermitente.

La epidemiología de los carcinomas en la piel ha demostrado ser un problema dominante de salud en muchos países, en especial en aquellos de población blanca. En nuestro medio la mayoría de los habitantes tiene un tipo de piel de III a IV que, en teoría, debería encontrarse protegida de los efectos nocivos de los rayos solares. Sin embargo, está demostrado que la piel más oscura es también víctima de la RUV si se expone en forma crónica y permanente; en consecuencia el color oscuro de la piel sólo protege de la quemadura solar, pero no de la cancerogénesis.

Cuando se realizan estudios epidemiológicos del cáncer de piel no sólo se debe registrar las tasas de morbilidad y mortalidad, sino también se debe registrar los factores de causalidad. El conocimiento de estos factores permitirá diseñar estrategias de prevención y educación a la comunidad.

Estadísticamente el carcinoma basocelular es el tumor más frecuente entre todos los tumores y en especial en los cutáneos, en segundo lugar se encuentran los carcinomas epidermoides y por último el melanoma maligno. Sin embargo se ha demostrado que la diferencia entre el carcinoma epidermoide y el melanoma maligno se está estrechando cada vez más y se estima que en el presente siglo el melanoma maligno tendrá una incidencia de 1 por cada 75 habitantes.

A continuación, nos referiremos brevemente a los carcinomas cutáneos más frecuentes en nuestro medio, relacionados con el tipo de piel.

i) carcinoma basocelular.

El carcinoma basocelular (CCB) es una neoplasia maligna de la piel que comúnmente se origina en las zonas expuestas en forma crónica a la luz solar. Se origina en las células basales del epitelio y de sus anexos, aproximadamente el 93 % se presenta en la cara, lo que evidencia que la RUV es la responsable del tumor. Este tumor, de crecimiento lento, excepcionalmente produce una diseminación metastásica; sin embargo, si no se lo trata o se lo hace inadecuadamente, puede ocasionar una extensa destrucción hística local y una muerte lenta e inexorable del paciente.

Desde el punto de vista epidemiológico el CCB es el cáncer más común, entre el cáncer de piel. Predomina en el sexo masculino, pero la diferencia con el sexo femenino se está reduciendo a causa de los cambios de vestimenta y de hábitos de las mujeres que conlleva a una mayor exposición en forma crónica a las radiaciones solares. Es probable que la mayor exposición al sol explique además por qué el CCB ya no es raro en los individuos jóvenes. En nuestro medio, de igual manera que en otras poblaciones, es el primer tumor en las estadísticas del cáncer de piel. Los habitantes más afectados son los con piel tipo III a IV.

Desde el punto de vista clínico, el CCB afecta a personas de edad avanzada con un incremento paulatino a partir de la quinta década. Cada vez se observan más casos nuevos en pacientes jóvenes como resultados de la exposición solar en forma permanente por razones ocupacionales, profesionales o recreativas. Se conocen siete formas clínicas del carcinoma basocelular con la característica, en todos ellos, de la presencia de un borde perlado.

La forma ulcerada (*ulcus rodens*) ubicada en la zona centro facial (Lámina XIIIa), es considerada de mal pronóstico por su carácter de destrucción local que llega a infiltrar el macizo facial dejando lesiones irreparables con alteraciones importantes en las funciones de respiración y de alimentación.

ii) carcinoma epidermoide.

El carcinoma epidermoide (CCS), conocido como espinocelular o carcinoma escamoso (Lámina XIIIb), es una neoplasia que se origina en los queratinocitos de la capa espinosa del epitelio cutáneo y es el segundo tumor más prevalente de la piel. A diferencia del CCB tiene el riesgo de diseminación metastásica, siendo más común la metástasis ganglionar que sistémica. La conducta biológica de esta neoplasia está directamente relacionada con un subgrupo de factores, constituidos por la diferenciación histológica, tamaño y profundidad del tumor, etiología y sitio anatómico

La epidemiología demuestra que es un tumor frecuente en edades avanzadas entre la sexta y séptima década de vida. Sin embargo, los jóvenes no son inmunes a esta neoplasia: 2,6 % de los casos se presentan entre los 30 y 39 años, incluso se ha informado casos en adolescentes. El sexo masculino está afectado en el doble que el femenino. El factor de riesgo más importante es la exposición actínica al aire libre. También se halla asociada al uso de lámparas solares y el tabaquismo. Otros factores de riesgo además del sexo y la edad son los genéticos, piel clara con poca capacidad de bronceado, predispuesta a las quemaduras del sol, cabello claro, ojos claros, úlceras crónicas, quemaduras, cicatrices. Los riesgos ambientales, además de la RUV, incluyen radiaciones ionizantes, exposición al arsénico, exposición a productos derivados del petróleo, etc.

En nuestra población, caracterizada por un tipo de piel oscura, de acuerdo con nuestra experiencia esta clase de tumor es menos frecuente que el melanoma maligno. Los casos observados están relacionados con lesiones previas como la queratosis actínica y radiaciones solares en los escasos pacientes de piel clara.

Clínicamente, se describen cuatro principales formas, la nodular, verrugosa, vegetante o en coliflor y úlcero-costrosa. La distribución topográfica es indistinta, dependiendo de los factores de predisposición o de riesgo. La afección en zonas expuestas como la cara, piel cabelluda, antebrazos y manos está directamente relacionada con la exposición a la RUV. en forma aguda e intermitente. La capacidad de diseminación metastásica se encuentra relacionada con

el factor etiológico: cuando se origina de una queratosis actínica su capacidad de metastizar es de 0,5 %, en cambio si se origina de una fístula es de 35 %. Los tumores que se originan en mucosas o semimucosas tienen mal pronóstico por su rápida diseminación metastásica.

iii) **melanoma maligno.**

El melanoma maligno (MM) es un tumor que se origina en los melanocitos, células responsables de la pigmentación de la piel. Se caracteriza por su agresividad y alta mortalidad, ligadas a los factores de riesgo.

La epidemiología del melanoma maligno (MM) se ha visto alterada en los últimos años por el incremento de su incidencia. Mientras en algunas poblaciones, como Australia y el norte de Europa, se ha detenido como resultado de las campañas de educación a la comunidad sobre fotoprotección, en especial en los niños, en otras se incrementó notablemente, llegando a estimarse un promedio de 1 caso por cada 75 habitantes. El incremento anual varía entre las diferentes poblaciones de acuerdo con las características de los factores de riesgo, pero en general está en el orden del 3 al 7% en las poblaciones caucásicas. En cambio en las poblaciones de piel más oscura es menor y oscila en el orden de 0,1 a 3 por 100.000 habitantes por año, dependiendo de la intensidad de la RUV recibida.

Es la principal causa de muerte por enfermedad de la piel. La tasa de mortalidad está aumentando más rápidamente que cualquier otro cáncer, razón por la cual se considera en muchos países como un problema de salud pública, por lo que se han diseñado estrategias para su control a través de programas de educación a la población y de programas de salud multidisciplinarios.

El MM clásicamente se divide en cuatro formas clínico-patológicas, cuya incidencia depende de varios factores, entre ellos: sexo, edad, localización, color de piel, ocupación y latitud geográfica, considerados como los principales factores de riesgo del MM.

El Melanoma extensivo superficial (MES) representa el 70% de los melanomas, presente en las piernas en las mujeres y en el tronco en los hombres. El Melanoma nodular (MN) ocupa el segundo lugar con 15%. Esta forma se caracteriza por su invasión profunda desde el inicio, con alta capacidad de metastizar y por su mayor frecuencia en los hombres. Estas dos formas clínicas guardan una similar epidemiología causal, caracterizada por piel blanca expuesta a las radiaciones solares en forma aguda e intermitente y por la respuesta cutánea a la quemadura.

Lámina XII a



Lámina XII b

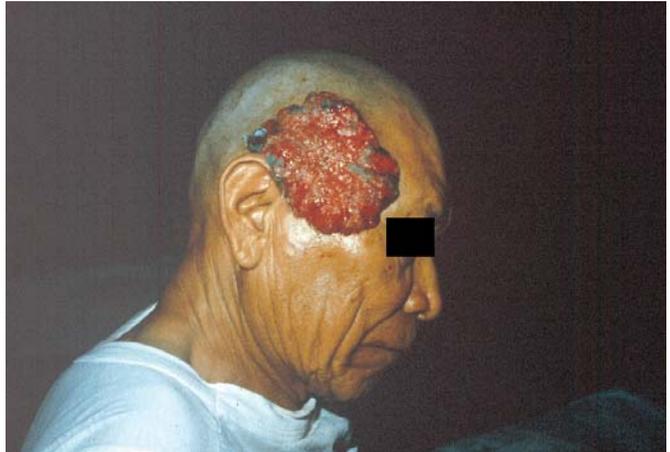


Lámina XII c

El Melanoma lentigo maligno (MLM) en la población de piel blanca es menos frecuente, Se ubica en la cara y en piel expuesta a los RUV en personas de edad avanzada. Desde el punto de vista epidemiológico tiene características similares al CCB por su exposición solar en forma crónica y permanente.

El Melanoma lentiginoso acral (MLA), no es frecuente en la raza blanca; se observa mayormente en la población negra y asiática. Las lesiones se presentan en las manos y piel, no está relacionado con la exposición a la RUV, posiblemente vinculado con traumatismos.

En nuestra población, de acuerdo con un estudio de 85 casos de MM realizado en la Unidad de Dermatología del Hospital de Clínicas Universitario se ha establecido que la primera forma clínico-patológica es el melanoma lentigo maligno (Lámina XIIc), el que está directamente relacionado con la radiación solar en pacientes que se encuentran sometidos a una exposición solar en forma crónica y permanente por razones ocupacionales, profesiones o recreativas.

5.6. Conclusiones.

Podemos concluir que el cáncer de piel en nuestro medio es tan importante como en poblaciones de piel blanca. El color de nuestra piel no es una garantía de protección, su incidencia está en relación con las condiciones socioeconómicas de nuestro país, con una inmensa mayoría de habitantes expuesta al sol por razones ocupacionales, razón por la cual se justifican las campañas de difusión y educación sobre las características de la RUV en la altura, los efectos nocivos para la salud y el peligro que conllevan los habitantes de la meseta Andina por exposición en forma crónica a los rayos solares.

BIBLIOGRAFÍA CONSULTADA CAPÍTULO 5

1. Abarca, J. Evaluación del paciente fotosensible. En: Chilena Dermatol. s.l.: s.e., 1997; 13(1), 31-51.
2. Araya, M.; Rivas, M.; Rojas, E.; Campos, L. Programa educativo sobre fotodaño y fotoprotección en la población de Arica. Primavera 1995. En: Chilena Dermatolgel. s.l.: s.e., 1997; 13(1), 17-25.

3. Armstrong, B.; Kricger, A. Skin cancer. En: *Dermatologic Clinics*. s.l.: s.e., 1995. 13(3), 583-94.
4. Arroyo Yustos, M.; De Portugal Fernández de Rivero, T.; García Rodríguez, M.; Alvarez-Mon Soto, M. Melanoma maligno, aspectos clínicos y terapéuticos. En: *Medicine*. s.l.: s.e., 1999. 7, 5483-9.
5. Berhane, T.; Halliday, G.; Cook, B.; Bernetson, C. La inflamación está asociada con el desarrollo de la queratosis actínica y el carcinoma de células escamosas en los humanos. En: *B.J. Dermatology*. s.l.: s.e., 2002. 146, 810-5.
6. Hawh, J.; Smith, N.; Black, M. Cuadros de fotosensibilidad. En: *Lever y Col. Histopatología de la piel*. – 8 ed. Buenos Aires: Interamericana, 1999. 277-82.
7. Junquera Llana, M.; Nosti Martínez, D.; Rodríguez Díaz, E.; Junquera Llana, B.; Bustillos, E.; Mendez, C.; Del Rio, J. Conocimientos y actitudes y prácticas de los adolescentes en torno a los efectos nocivos del sol y la fotoprotección. En: *Actas Dermatosifilgr*. s.l.: s.e., 1998. 89, 247-52.
8. Monasterios, H.; Rios, E.; Encinas, S.; Rollano, F.; Parra, E.; Oliver, V.; Villarreal, M. Experiencia de cinco años de campaña de lucha contra el cancer de piel. "semana del lunar" en la ciudad de La Paz. En: *Rev. Boliviana de Dermatología*. 2002. 1, 63-7.
9. Nudelman, L.G. Fotocitoimmune protectors. En: *Act. Terap. Dermatol*. s.l.: s.e., 1998. 21,166-8.
10. Paredes de Rios, V.; Rios, J. Dermatitis y radiación en la altura. En: *Rev. Boliviana de Dermatología*. s.l.: s.e., 2002. 1, 19-22.
11. Pereiro Ferreiros, M.; Amrouni, B.; Pereiro Ferreiros, M. Jr. Fotodermatitis. En: *Medicine*. s.l.: s.e., 1999. 7, 6393-7.
12. Ramos Lage, I.; Armas Ramírez, E.; Rondon Ayala, J. Epidemiología del cancer de la piel no melanoma. En: *Rev. Cubana Oncol*. s.l.: s.e., 2001.17(1), 43-7.
13. Rollano, F.; Encinas, S.; Monasterios, H.; Parra, E.; Valda, L. Melanoma maligno: estudio epidemiológico de 85 casos. En: *Rev. Boliviana de Dermatología*. s.l.: s.e., 2002. 1, 7-10.

14. Santiesteban, M.; Stenguel, F. Fotoprotección tónica agents activosparticulados. En: Arch. Argent. Dermatol. s.l.: s.e., 2001. 51, 109-18.
15. Saul, A. Fotodermatosis. En: Lecciones de dermatología. – 10 ed. s.l.: Franco Mendez Cervantes. s.l.: s.e., 1983. 372-8.
16. Stenguel, F.; Santiesteban, M. Reflexiones sobre fotoprotección tónica su rol e importancia en la prevención del daño actínico. En: Arch. Argen. Dermatol . s.l.: s.e., 2000. 50, 99-107.
17. Soto MD J. Búsqueda active del cancer cutáneo. En Rev. Boliviana de Dermatología. s.l.: s.e., 2002. 1, 68-9.
18. Valda, L.; Rollano, F.; Monasterios, H. Texto oficial de dermatología de la cátedra de dermatología. La Paz: Facultad de Medicina, UMSA, s.f.
19. Valle-Pinto, R.; Wilkinson - Obert, O.; Morales, J. Tumores malignos, incidencia y presentación clínica en le Hospital Escuela. En: Rev. Esp. Patol. s.l.: s.e., 1999. 33(1).

LA RADIACIÓN ULTRAVIOLETA Y EL OJO HUMANO

Dr. Héctor Guillén Tamayo,

Oftalmólogo, Arequipa, Perú
guillent@star.com.pe

El ojo, después de la piel, es el órgano más expuesto a los efectos de la radiación ultravioleta (RUV). Así como la RUV puede causar daños en la piel humana, también puede ocasionar diversos problemas o enfermedades en los ojos. De un modo general, la sobre-exposición a cualquier tipo de radiación puede llevar a estos daños. La tabla 6.1. presenta el tipo de problema en relación con la longitud de onda (Lámina XIII).

Cuanto más energética sea la radiación (o sea, cuanto menor sea la longitud de onda) mayor el daño causado a la estructura ocular. Por esta razón las radiaciones UV son más nocivas que la luz de longitud de onda visible o infrarroja. Otro factor que diferencia los daños causados por la radiación UV es que sus efectos no son inmediatos. Mientras la radiación infrarroja se manifiesta en forma de calor y la luz visible puede ser vista, la radiación ultravioleta no provoca ninguna reacción que despierte alguno de los sentidos del ser humano.

6.1. Sensibilidad.

De la misma forma que nuestra piel, el ojo de una persona a otra puede ser más o menos sensible a las radiaciones. De acuerdo al color de sus ojos (pigmentación), sus hábitos de vida, edad y las condiciones de salud del individuo, esa sensibilidad puede ser mayor o menor. Los tejidos que componen el globo ocular poseen una transparencia media en relación a la luz, y esa transparencia es relativa a la longitud de onda.

La figura 6.1 representa un corte esquemático del ojo humano y el porcentaje de radiación ultravioleta absorbida en cada uno de sus elementos. La córnea es responsable por la absorción de prácticamente toda la radiación UVC (la más energética y la más nociva), aunque ausente de la radiación solar que llega a la Tierra. El cristalino desempeña un papel importante en la protección de la RUV por lo que la cirugía de extracción de catarata, al eliminar ese elemento de la estructura ocular, modifica bruscamente esa condición de protección.

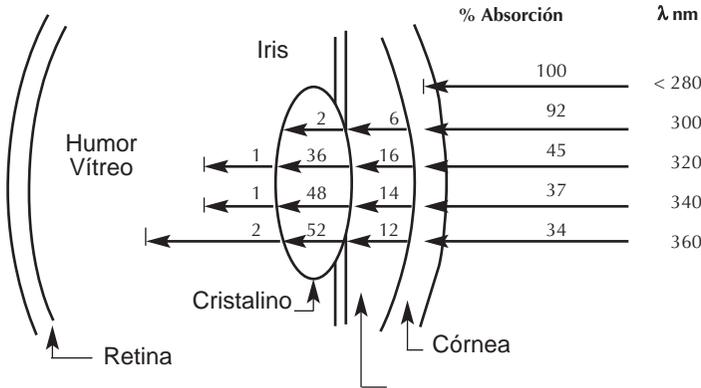


Figura 6.1. Representación esquemática del ojo humano. Se indica los coeficientes de absorción de cada elemento.

Es de notar que actualmente, de norma, los lentes intraoculares se fabrican con un filtro contra la RUV y algunas de las mejores marcas de lentes de contacto también poseen este filtro anti-UV incorporado. Los bebés e infantes corren mayores riesgos de sufrir daños oculares debido a la mayor transparencia de su cristalino. Consecuentemente absorben más radiación que un adulto. Esto ocurre debido a que el cristalino tiende en forma natural a tornarse más opaco con la edad y, así, puede absorber y filtrar más cantidad de radiación.

6.2. Tipos de daño.

Los daños causados a la vista pueden ser divididos, de acuerdo con la forma de exposición en dos tipos distintos: exposiciones cortas a intensa cantidad de radiación y exposiciones largas a baja intensidad de radiación.

Lámina XIII

Tabla 6-1 Efectos de la radiación sobre el ojo

Región espectral	Longitud de onda nm	Tejido	Sitio de Absorción	Tipo de daño
UVC UVB UVB UVA	<280 / 280 - 320 280 - 320 / 320 - 400	Córnea Cristalino	Epitelio Núcleo	Fotoquímico (Fotoqueratitis) Fotoquímico (Catarata)
VISIBLE	400 - 750	Retina	EPR	Térmico
VISIBLE	400 - 750	Retina	Hemoglobina	Hemorragias
VISIBLE	400 - 750	Retina	Pigmento macular	Discromatopsias
IRA	780 - 1,400	Retina	EPR	Térmico
IRA	780 - 1,400	Cristalino	Epitelio	Catarata
IRB	1,400 - 3,000	Córnea	Epitelio	Opacidades
IRC	3,000 - 10,000	Córnea	Epitelio	Quemaduras superficiales

Tabla 6-2 Lesiones Oculares según la Radiación

Tipo de onda	Ultravioleta			Visible	Infrarrojo		
	UV-C	UV-B	UV-A				
Longitud de Onda	200	290	320	400	750	1400	10°
Lesión Ocular		Queratitis				Catarata	
			Catarata			Quemadura Corneal	
			Lesiones de Retina				

En el primer caso el elemento que más sufre es la córnea y las manifestaciones son agudas y surgen después de un período de latencia. Ejemplos típicos de este tipo de daño son la fotoftalmía por soldadura y la de las nieves (o surumpi). En el otro caso, común en los ambientes de trabajo o industriales, el cristalino y la retina son los más afectados.

En ambos casos la manifestación se puede tornar un proceso crónico. Las dosis elevadas producen fotoconjuntivitis y fotoqueratitis, pero las exposiciones largas, tanto como las bajas intensidades, pueden también producir cataratas, pterigiones, maculopatías o carcinomas. Lesiones que, muchas veces, necesitan de intervención quirúrgica, pues son irreversibles. La tabla 6.2. en la Lámina XIII muestra las lesiones oculares según la banda de radiación ultravioleta.

Las inflamaciones de la córnea y de la conjuntiva son secuelas de la radiación UVB (<320 nm). Los síntomas de ambas enfermedades se caracterizan por dolor, lagrimeo, sensación de cuerpo extraño, fotofobia, blefarospasmo e hiperemia palpebral. Las lesiones palpebrales son las que tienen demostrada relación directa con la exposición a la luz solar, principalmente las lesiones malignas. La radiación UVA (320-400 nm) es señalada como responsable por el desarrollo de las cataratas, sobre todo por las corticales y las subcapsulares posteriores. Existe mucha discusión en torno a este asunto. Pero hay muchas evidencias indirectas de que la sobre-exposición a las radiaciones en esas longitudes de onda sea una de las catalizadoras de la enfermedad.

6.3. Factores de riesgo.

- Aunque los niños y las personas que trabajan al aire libre -como los vendedores ambulantes, geólogos, agrónomos, agricultores, profesores de educación física, policías, deportistas- por la dosis acumulada son aquellas que presentan los mayores riesgos, nadie está inmune a las lesiones oculares.
- Alrededor del mediodía la intensidad de la radiación solar es máxima. La exposición al sol debe ser evitada entre las 10 hrs. y las 15 hrs. en Bolivia.
- Los efectos de la RUV son acumulativos. Las personas que se exponen a la radiación solar desde la infancia presentan mayor propensión al desarrollo de enfermedades, tanto de la piel como de los ojos, relacionadas con la RUV.
- Cuanto más próximo a la región ecuatorial del planeta o cuando mayor sea la altitud mayor cantidad de RUV en la superficie terrestre.

- Las personas operadas de catarata y que no posean implantado un lente intraocular deben tomar las debidas precauciones.
- Las actividades en la playa, de pastoreo en la nieve o en las estaciones de esquí deben ser particularmente vigiladas pues la RUV es reflejada de manera eficaz en superficies como el agua, la arena o la nieve.
- La presencia de nubosidad es un factor que atenúa la cantidad de RUV en la superficie. Pero cuando la cobertura de las nubes es escasa la cantidad de radiación esparcida también puede ser más intensa que en condiciones normales. El uso de anteojos con protección ultravioleta es recomendable.

6.4. Prevención.

La radiación solar llega a los ojos en forma directa e indirecta (radiación difusa). Esa segunda forma es aún más importante en el caso de RUV y se hace evidente en el caso de los soldadores que no usan máscara. Como la RUV no es necesaria para la visión, uno siente que no hay por qué protegerse.

Los filtros impregnados en la construcción de los anteojos fotocromáticos deberían ser opacos a las longitudes de onda menores a 400 nm (UV) y mayores que 700 (IR). Pero la mayoría de los lentes permiten el pasaje de cierta cantidad de radiaciones en esas longitudes de onda. Los cristales transparentes sólo reducen la exposición en 16% de la RUV total, mientras otros orgánicos o resinas solamente retienen cerca de 0.2%.

Los anteojos con lentes plásticas de venta ambulatoria informal prácticamente no ofrecen garantía y hasta pueden presentar distorsiones que perjudiquen la visión. Asimismo, se recomienda el uso de un sombrero de ala ancha de hasta 8 cm para ofrecer mayor protección. Las lentes adecuadas deben: (1) eliminar entre 99 y 100% de RUV, (2) eliminar entre 75 y 90% de la radiación visible para evitar incomodidades oculares y reflexiones excesivas, y (3) estar libres de imperfecciones ópticas.

RADIACIÓN ULTRAVIOLETA SOLAR EN EL LAGO TITICACA, BOLIVIA: EFECTOS Y ADAPTACIONES DE LOS ORGANISMOS PLANCTÓNICOS

Virginia E. Villafañe* y E. Walter Helbling

Estación de Fotobiología Playa Unión &
Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET)
Casilla de Correos N° 153 – (9100) Trelew, Chubut, Argentina
virginiav@efpu.com.ar

7.1. Introducción.

La radiación solar que llega a la superficie de la Tierra normalmente excede los niveles requeridos por los organismos fotosintéticos. Por ejemplo, los niveles óptimos de la radiación fotosintéticamente activa (PAR, 400-700 nm, o luz visible) para los organismos acuáticos está en el rango de 50-60 W m⁻², mientras que en un día de verano y sin nubes la radiación recibida en el área del Lago Titicaca se encuentra en el orden de 500 W m⁻². Esto sugiere que, desde el punto de vista de radiación PAR, los organismos acuáticos se encuentran normalmente bajo un estrés lumínico. Por otra parte, la radiación ultravioleta (RUV, 280-400 nm), tanto en sus niveles normales como aumentada durante períodos de disminución de ozono estratosférico puede causar un impacto adicional en los organismos, tal como ha sido demostrado en numerosos estudios (e.g., De Mora et al., 2000; Helbling & Zagarese, 2003).

El Lago Titicaca es un ecosistema único debido a sus características extremas de radiación, constituyendo un sitio especialmente interesante para estudiar e interpretar el impacto producido por la RUV en los organismos. Por un lado, el Lago Titicaca se encuentra en una zona tropical (figura 7.1), recibiendo altos niveles de RUV durante todo el año (ver Cap. 4). Por otro lado, la concentración de ozono en estas latitudes es menor que en otras regiones, con una media anual de ~ 255

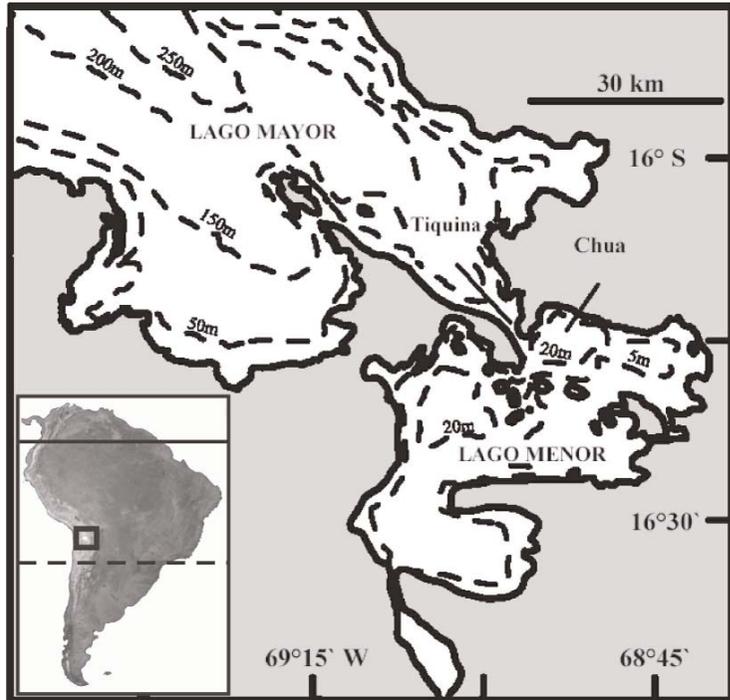


Figura 7.1. Mapa del Lago Titicaca indicando el área de estudio (fosa de Chua). Inserto se indica la ubicación relativa del Lago Titicaca en América del Sur.

Unidades Dobson (U.D.) (Zaratti et al., 1999), mientras que en las zonas polares alcanza valores de hasta 450 U.D. (Stolarski et al., 1992). Por lo tanto la RUV-B, que es fuertemente absorbida por el ozono estratosférico, es mayor en las zonas tropicales que en los polos. Finalmente el Lago Titicaca, el más alto navegable en el mundo, se encuentra a 3810 m de altitud, por lo cual recibe mayor radiación que un sitio ubicado a la misma latitud pero a nivel del mar. El efecto de la altitud en la cantidad de radiación es considerable, ya que algunos estudios han demostrado que la RUV aumenta ~ 7-20 % cada 1000 m de elevación (Blumthaler & Rehwald, 1992; Andrade et. al, 1998; Zaratti et al 2002).

En este capítulo presentaremos el estado de nuestro conocimiento acerca de los efectos de la RUV en dos niveles tróficos básicos del Lago Titicaca, el fitoplancton y zooplancton. Con este fin, presentaremos una breve reseña sobre las características ópticas del lago, y luego los efectos de la RUV y mecanismos de aclimatación en organismos fitoplanctónicos y zooplanctónicos, específicamente en el copépodo *Boeckella titicacae* (Harding). Finalmente, concluimos el trabajo con algunas ideas sobre estudios futuros necesarios para lograr una comprensión más completa acerca del impacto de la RUV en organismos acuáticos del Lago Titicaca.

7.2. Penetración de la radiación en la columna de agua.

La radiación solar se atenúa en la columna de agua, siendo varios los factores que contribuyen a esta atenuación. Si bien el agua absorbe parte de la radiación, los principales componentes responsables de este proceso son la materia orgánica disuelta (especialmente los compuestos carbonados) y la materia orgánica particulada (e.g., fitoplancton). Por lo tanto, para calcular la cantidad de radiación que recibe un organismo es necesario primero medir la radiación en superficie y luego determinar el porcentaje de esta radiación incidente que penetra en la columna de agua, lo cual implica el cálculo del coeficiente de atenuación - K^d . Existen numerosos trabajos sobre la caracterización del campo lumínico subacuático, tanto en relación al instrumental como las variables que condicionan la atenuación de la radiación en el agua (e.g., Kirk, 1994; Hargreaves, 2003 entre otros). En esta sección nos concentraremos en la información disponible sobre la penetración de la RUV-B (280-315 nm), RUV-A (315-400 nm) y PAR (400-700) en el Lago Titicaca, para luego poder entender los efectos potenciales que pueden causar estas longitudes de onda sobre los organismos.

A comparación con otros lagos andinos, por ejemplo El Trébol y Morenito en la zona Patagónica ($K_{PAR} = 0.40$ y 0.46 m^{-1} , respectivamente) (Helbling et al., 2001a), las

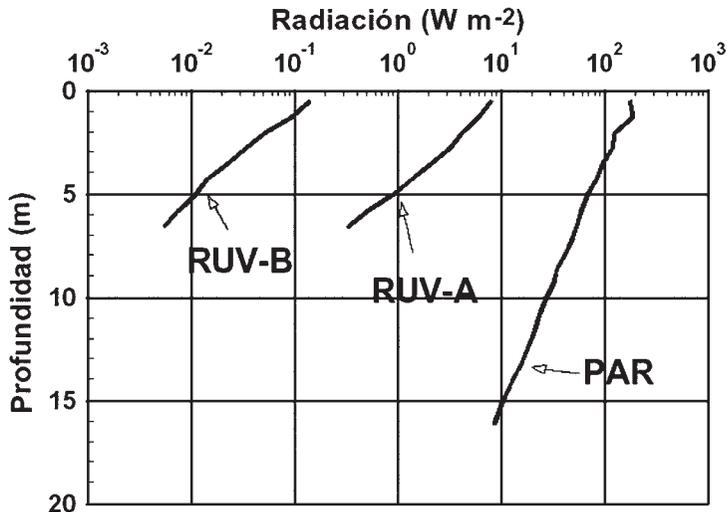


Figura 7.2. Penetración de la radiación solar en aguas del Lago Titicaca (fosa de Chua) durante el mes de octubre de 1998. Los datos fueron obtenidos con un espectroradiómetro (ELDONET, Real Time Computers Inc.) el cual posee canales para la medición de RUV-B (280-315 nm), RUV-A (315-400) y PAR (400-700).

aguas del Lago Titicaca pueden considerarse relativamente transparentes (figura 7.2), con un K_{PAR} de 0.20 m⁻¹, mientras que los correspondientes KRUV-A y KRUV-B son de 0.52 y 0.54 m⁻¹, respectivamente. Por su parte, la zona eufótica (i.e., zona que va desde la superficie hasta la profundidad donde llega el 1% de PAR incidente en superficie) se extiende hasta los 23 m de profundidad, y la profundidad de la zona epilimnética (i.e., la zona de mezcla vertical) se ha determinado en 18 m (Villafañe et al., 1999). Es de destacar, sin embargo, que estas características no son uniformes, dependen del sitio de estudio y tienen además marcados cambios estacionales, que son función de numerosos factores – e.g., variaciones en las condiciones atmosféricas y biológicas. Por ejemplo, otros trabajos (Richerson et al., 1977; Lazzaro, 1981) han determinado valores de K_{PAR} del orden de 0.05 m⁻¹ en el mismo lago Titicaca. En todo caso, los altos niveles de radiación incidente en superficie sumados a la baja atenuación de la radiación solar en la columna de agua permite suponer que los organismos planctónicos del Lago Titicaca están sometidos normalmente a un estrés lumínico a lo largo del día y durante todo el año.

7.3. Efectos de la radiación solar en el fitoplancton.

Los organismos autótrofos (e.g., el fitoplancton) utilizan la radiación solar durante el proceso fotosintético, razón por la cual se estudian con especial interés. En el Lago Titicaca se han realizado varios trabajos orientados a determinar la productividad primaria fitoplanctónica (Lazzaro, 1981; Neale & Richerson, 1987; Richerson et al., 1977; 1986; 1992; Vincent et al., 1984; Villafañe et al., 1999; Helbling et al., 2001b), pero son muy escasos aquellos destinados a evaluar el proceso de fotoinhibición fotosintética, tanto debida a PAR (Vincent et al., 1984; Neale & Richerson, 1987; Richerson et al., 1992) como a la RUV (Villafañe et al., 1999; Helbling et al., 2001b).

La figura 7.3 presenta datos representativos acerca de los efectos de la RUV en comunidades fitoplanctónicas del Lago Titicaca. Es posible observar que la fotosíntesis se inhibe fuertemente en superficie, disminuyendo la incorporación de carbono desde valores de 4.1 mg C m⁻³ h⁻¹ a 0.7 mg C m⁻³ h⁻¹ en el tratamiento que recibió el total de la radiación; a los 6 m de profundidad (i.e., 1.5 profundidades ópticas) no existen diferencias significativas entre los tratamientos lumínicos. Sin embargo, aunque la inhibición debida a la RUV en superficie es importante (~75%), las pérdidas integradas en la zona eufótica son considerablemente menores ~14% y 3.4% para RUV-A y RUV-B, respectivamente (cuadro inserto en la figura 7.3c). Es

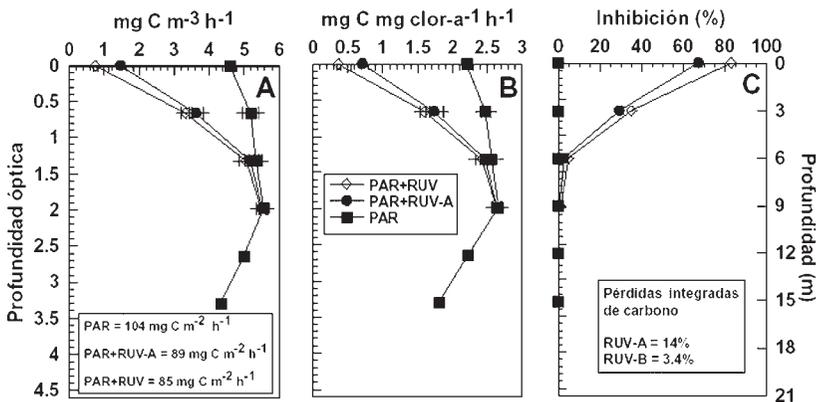


Figura 7.3. Efecto de la radiación solar *in situ* en el fitoplancton del Lago Titicaca, determinado en la incorporación de carbono (A), en el número de asimilación (B) y en el porcentaje de inhibición fotosintética (C). (Después de Helbling et al. 2001b).

importante notar el hecho de que la mayor parte de la inhibición se debe a la RUV-A, con una menor contribución debida a la RUV-B, lo cual se observa también en muchas regiones del mundo (e.g., Kim & Watanabe, 1993; Villafañe et al., 2001).

Otro de los efectos causados por la RUV es el daño en el material genético (ADN), el cual se produce principalmente por la formación de “ciclobutane pirimidine dimers” (CPDs), especialmente en forma de dímeros de timina (Buma et al., 1997; Boelen et al., 2000). En el Lago Titicaca se han realizado estudios tendientes a evaluar los efectos producidos por la RUV en el ADN del fitoplancton (Helbling et al., 2001b) y se ha encontrado que, a diferencia de la fotoinhibición, el daño se debe solamente a la RUV-B, ya que es en estas longitudes de onda donde absorbe el ADN (figura 7.4) Es importante notar que, a comparación con el fitoplancton de otros ambientes acuáticos, por ejemplo el de latitudes medias Patagónicas (Buma et al., 2001; Helbling et al., 2001c), el del Lago Titicaca presenta niveles absolutos de daño en el ADN mucho más bajos, máximo de aproximadamente 600 versus 70 CPDs* 106 nucleótidos, respectivamente.

Aunque es evidente que la RUV natural causa efectos negativos en el fitoplancton del Lago Titicaca, existen diversos mecanismos a través de los cuales se puede contrarrestar y/o disminuir el impacto producido por estas longitudes de onda. Estos mecanismos incluyen la evasión del estrés de radiación (i.e., migración vertical hacia aguas más profundas), reparación del daño en el ADN (i.e., fotoreparación y escisión / reparación) y síntesis de compuestos protectores (e.g., “mycosporine li-

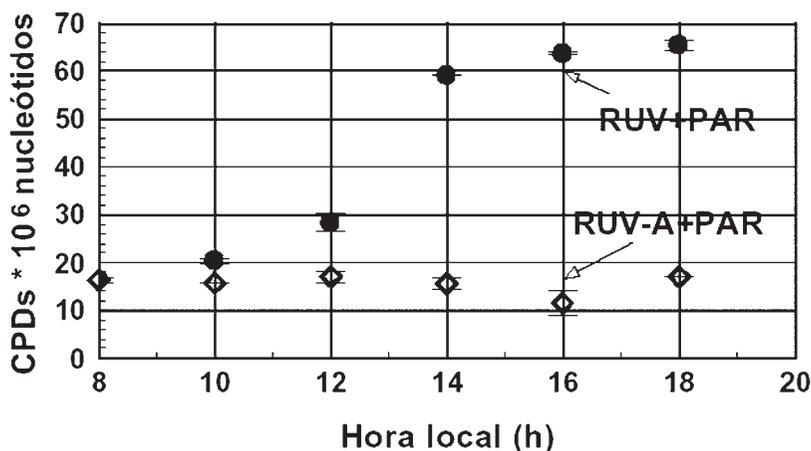


Figura 7.4. Daño en el material genético (medido a través de la formación de CPDs) en el fitoplancton del Lago Titicaca en función de la exposición a la radiación solar en distintas horas del día y bajo distintos tratamientos de radiación. (Después de Helbling et al. 2001b).

ke aminoácidos” – MAAs) (Banaszak, 2003). En particular, los estudios realizados en el Lago Titicaca demuestran que los MAAs son relativamente escasos en el fitoplancton, lo cual supone que la presencia de estos compuestos no constituye la estrategia primaria de protección en estas especies (Villafañe et al., 1999).

7.4. Efectos de la RUV en el zooplancton: El caso de *Boeckella titicacae*.

Existen numerosos estudios que demuestran que la RUV es capaz de afectar negativamente la actividad, el desarrollo y la supervivencia de los organismos zooplanctónicos (Zagarese & Williamson, 2000). En el Lago Titicaca se han llevado a cabo estudios tendientes a determinar los efectos de la RUV en el zooplancton, específicamente en el copépodo *Boeckella titicacae*, como así también el rol que cumplen los MAAs en estos organismos (Helbling et al. 2002).

Los MAAs, que absorben RUV en el rango de longitudes de onda entre 310 y 360 nm, son solamente sintetizados por algunas especies de fitoplancton, macroalgas y cianobacterias, y en diversos organismos se ha demostrado su capacidad de protección ante niveles perjudiciales de RUV (Roy, 2000). En el caso del Lago Titicaca, si se comparan los espectros de absorción del fitoplancton y del zooplancton

pueden observarse diferencias interesantes (figura 7.5): En el fitoplancton existe una muy pequeña absorción en las longitudes de onda de la RUV, mientras que en *B. titicacae* (mantenido en condiciones de alta y baja RUV) esta absorción es mucho mayor. Tanto para el fitoplancton como para el zooplancton, se ha determinado que los responsables de esos picos de absorción son los MAAs (Helbling et al. 2002). Si bien el zooplancton no es capaz de sintetizar MAAs, se sabe que estos compuestos se transfieren desde el fitoplancton y posteriormente se acumulan en otros niveles tróficos (Roy, 2000). Por lo tanto, aunque la concentración de MAAs en el fitoplancton era relativamente baja, es evidente que *B. titicacae* los bioacumuló en forma muy efectiva, siendo su acumulación función de los niveles de radiación a los cuales se encontraban expuestos tanto el fitoplancton como *B. titicacae*. Es así que la concentración de estos compuestos (siendo los dos más abundantes shinorine y porphyra-334) es varias veces mayor en las muestras expuestas a altos niveles de radiación que en las expuestas a bajas irradiancias.

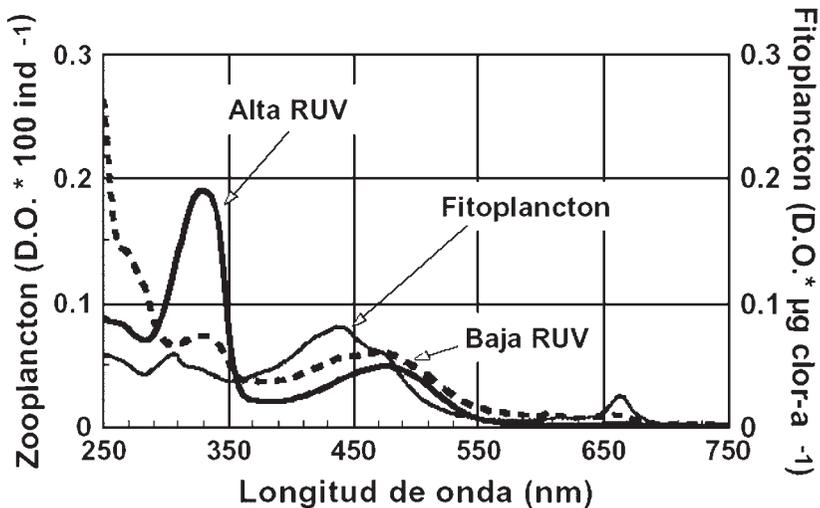


Figura 7.5. Espectros de absorción del planton del Lago Titicaca. Nótese la alta absorvancia del zooplancton en la región de la RUV.

Surge la pregunta: ¿protegen estos compuestos a *B. titicacae*? La respuesta es sí. Los experimentos diseñados para determinar la mortalidad de *B. titicacae* bajo distintas condiciones de radiación, muestran que ésta es función de la calidad y cantidad de RUV recibida (figura 7.6A). Es así que, por un lado, la mortalidad aumenta cuando los organismos reciben radiación de longitudes de onda más bajas. Por

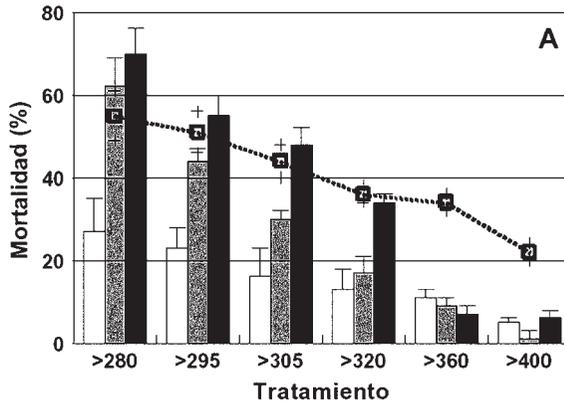
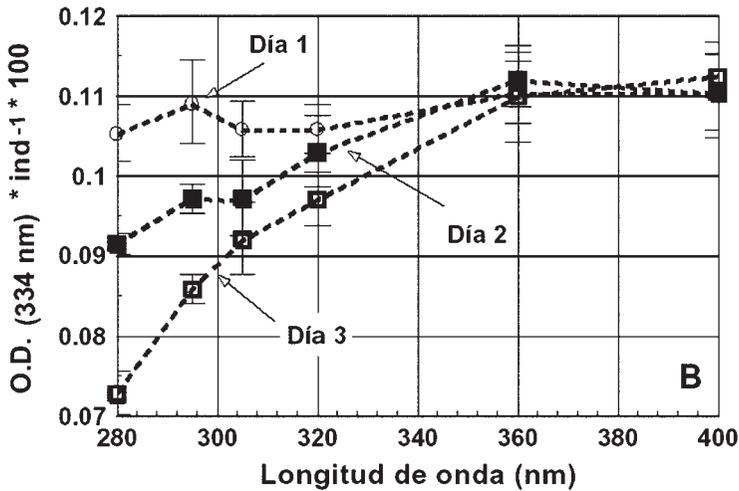


Figura 7.6. Efectos de la radiación solar en el zooplancton del Lago Titicaca.

A) Arriba. Mortalidad en función de distintas longitudes de ondas y para distintos días de exposición. Día 1: barras blancas; día 2: barras grises; día 3: barras negras. La línea de puntos y símbolos indican la mortalidad del zooplancton con bajo contenido de MAAs.

B) Abajo. Disminución de la concentración de MAAs en el zooplancton en función de la cantidad y calidad de radiación recibida. (Después de Helbling et al., 2002).



otro lado, se observa que la mortalidad aumenta cuando los individuos reciben dosis mayores de radiación (i.e., exposición continua por varios días). Asimismo, se ha podido determinar que este aumento de mortalidad estaba relacionado con una disminución en la concentración de MAAs, la cual ocurría durante el experimento (figura 7.6B). Además, cuando los organismos recibían igual dosis de radiación

(e.g., Día 1), aquellos con alta concentración de MAAs (barras blancas en la figura 7.6A) tuvieron una menor mortalidad que los que poseían una baja concentración (símbolos unidos con línea de puntos en la figura 7.6A). Es evidente, por lo tanto, que los MAAs cumplen una función sumamente importante de protección en *B. titicacae*, aunque probablemente otros factores contribuyan también a minimizar los efectos de la RUV en estos organismos.

7.5. Sensibilidad a la RUV de los organismos planctónicos del Lago Titicaca.

Los estudios llevados a cabo hasta el momento sugieren que el fitoplancton del Lago Titicaca es más resistente a la RUV que el de otras regiones del planeta. Esta relativa baja sensibilidad a la RUV también puede observarse en las funciones biológicas de peso (“biological weighting functions”, BWFs) (Helbling et al., 2001b) cuando se las compara con especies polares con alta sensibilidad a la RUV (Helbling & Villafañe, 2002). Por otra parte, los estudios realizados en el Lago Titicaca (Helbling et al., 2001b) revelan la presencia de un valor umbral de radiación por debajo del cual no se observan efectos significativos de la RUV, el cual es más alto que el determinado en especies del Ártico (0.3 y 0.1 W m⁻² para RUV-B, respectivamente).

Al momento, no es posible determinar con exactitud cuáles son las razones por las cuales el fitoplancton del Lago Titicaca es más resistente a comparación del de otras zonas del mundo. Por un lado, debe considerarse su historia evolutiva de adaptación a altos niveles de radiación (e.g., factores intrínsecos de origen genético), y por otra parte, factores tales como el tamaño celular predominante en las comunidades parecen jugar un rol sumamente importante (Helbling et al., 2001b). Las células del Lago Titicaca están principalmente incluidas en la fracción nanoplanctónica (< 20 µm de tamaño efectivo), las cuales se caracterizan por su mayor resistencia en cuanto a la inhibición fotosintética (Helbling et al. 2001a); por su parte, aunque las células relativamente pequeñas parecen ser más vulnerables al daño en el material genético (Helbling et al. 2001c), es probable que en la columna de agua existan mecanismos para remover los CPDs en forma muy efectiva (Helbling et al. 2001b).

Con respecto al zooplancton del Lago Titicaca, si se comparan las BWFs obtenidas en distintas condiciones de radiación, con otras de especies cercanas características de latitudes más altas (i.e., individuos del mismo género), se puede inferir que

B. titicacae es una especie resistente a la RUV (figura 7.7). Esto también puede comprobarse independientemente a través de una comparación de valores de dosis letales a las cuales muere el 50% de los individuos (i.e., DL_{50}): mientras que la DL_{50} (RUV-B) en *B.titicacae* (conteniendo alta concentración de MAAs) es de 56 kJ m^{-2} , las de *B. brevicaudata*, *B. gibbosa* y *B. gracilipes* son de 32, 8.4 y 1.1 kJ m^{-2} , respectivamente (Helbling et al. 2002). Indudablemente, esta alta resistencia de *B. titicacae* se debe en gran parte a la presencia de MAAs; sin embargo, es probable que otros factores contribuyan a esta resistencia, entre los cuales podrían ser importantes la capacidad de migración vertical en la columna de agua, la posibilidad de reparar efectivamente el daño producido en el ADN, y la presencia de otros tipos de compuestos potencialmente protectores distintos de los MAAs, por ejemplo carotenoides.

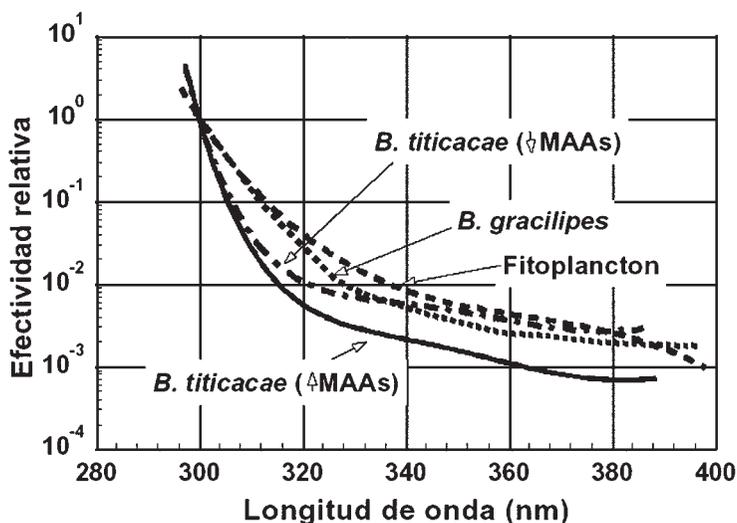


Figura 7.7. Funciones biológicas de peso para el plancton del Lago Titicaca y para una especie de zooplancton de lagos patagónicos.

7.6. Conclusiones y futuras investigaciones.

El Lago Titicaca es un ecosistema único por sus condiciones extremas de radiación para llevar a cabo investigaciones fotobiológicas, en especial en lo referente a los efectos de la RUV sobre diversos organismos. Los estudios realizados al respecto son muy escasos, y es evidente que existen numerosos aspectos que deben incluir-

se en investigaciones futuras en el campo de la Fotobiología de las especies del Lago Titicaca.

Hasta el momento, la mayor parte de los estudios han sido realizados en períodos cortos de tiempo, los cuales proporcionan información básica sobre los efectos extremos de la RUV en los organismos; en el futuro, será necesario ahondar en lo referente a los efectos a largo plazo para poder evaluar los procesos de aclimatación, que ocurren en escalas temporales mayores a un día. En cuanto a los organismos, es importante continuar con los estudios relacionados con los efectos de la RUV en los distintos niveles tróficos de la red alimentaria, no sólo en el plancton, sino también en otras especies, incluyendo peces de interés comercial. Estos estudios proporcionarán información sumamente importante con respecto a los factores que contribuyen a la resistencia a la RUV, como así también a los diversos aspectos mecanicísticos de esta adaptación (e.g., físicos, bioquímicos). Por otra parte, los futuros estudios deberán considerar otros factores que pueden interactuar con la RUV, tales como la concentración de CO₂, temperatura y nutrientes, que pueden ser responsables también de las respuestas observadas. Con todos estos conocimientos, será posible entender no sólo el impacto de la RUV a nivel de organismos, sino también a nivel de comunidad y ecosistema, y sus consecuencias en la biodiversidad del Lago Titicaca.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos especialmente al Dr. Zaratti y al personal del Laboratorio de Física de la Atmósfera (LFA, UMSA) por su colaboración para la realización de estos estudios. Asimismo, agradecemos al personal del Centro de Desarrollo Piscícola del Altiplano (CIDPA) y del Instituto de Limnología (UMSA) por su ayuda en los trabajos de campo. Estos trabajos fueron financiados por el Fondo Argentino de Cooperación Internacional (FO-AR, Proyectos N° 2614, ARG/92/004 y 3783) y la Fundación Playa Unión. Contribución N° 44 de la EFPU.

BIBLIOGRAFIA CONSULTADA CAPITULO 7

1. Andrade, M.; Forno, R.; Palenque, E. R.; Zaratti, F. Estudio preliminar del efecto de altura sobre la radiación solar ultravioleta B. En: Revista Boliviana de Física. La Paz: UMSA, 1998. 4, 14.

2. Banaszak, A. Photoprotective physiological and biochemical responses of aquatic organisms to UVR. En: Helbling, E. W.; Zagarese, H.E. ed. UV Effects in aquatic organisms and ecosystems. London: The Royal Society of Chemistry, 2003. Comprehensive Series in Photochemistry and photobiology. (En prensa).
3. Blumthaler, M.; Rehwald, W. Solar UV-A and UV-B radiation fluxes at two alpine stations at different altitudes. En: Theoretical Applied Climatology. s.l.: s.e., 1992. 46, 39-44.
4. Boelen, P.; Boer, M.K.; Kraay, G.W.; Veldhuis, M.J.W.; Buma, A.G.J. UVBR-induced DNA damage in natural marine picoplankton assemblages in the tropical Atlantic Ocean. s.l.: s.e., 2000. 1-9. -- Marine Ecology Progress Series 193.
5. Buma, A.G.J.; Engelen, A.H.; Gieskes, W.W.C. Wavelength-dependent induction of thymine dimers and growth rate reduction in the marine diatom *Cyclotella* sp. Exposed to ultraviolet radiation. s.l.: s.e., 1997. 91-7. -- Marine Ecology Progress Series 153.
6. Buma, A.G.J.; Helbling, E.W.; Boer, M.K.; Villafañe, V.E. Patterns of DNA damage and photoinhibition in temperate South-Atlantic phytoplankton exposed to solar ultraviolet radiation. En: Journal of photochemistry and photobiology B.: Biology. s.l.: s.e., 2001. 62, 9-18.
7. De Mora, S.; Demers, S.; Vernet, M. The effects of UV radiation in the marine environment. s.l.: Cambridge University Press, UK, 2000. 324p. Cambridge Environmental Chemistry Series 10.
8. Hargreaves, B. Water column optics and penetration of UVR. En: Helbling, E.W.; Zagarese, H.E. ed. UV effects in aquatic organisms and ecosystems. London: The Royal Society Chemistry, 2003. Comprehensive Series in Photochemistry and photobiology. (En Prensa).
9. Helbling, E.W.; Villafañe, V.E.; Barbieri, E.S. Sensitivity of winter phytoplankton communities from Andean lakes to artificial ultraviolet-B radiation. En: Revista Chilena de Historia Natural. s.l.: s.e., 2001. 74, 273-82.
10. Helbling, E.W.; Villafañe, V.E.; Buma, A.G.J.; Andrade, M.; Zaratti, F. DNA damage and photosynthetic inhibition by solar ultraviolet radiation in tropical phytoplankton (Lake Titicaca, Bolivia). En: European Journal of Phycology. s.l.: s.e., 2001. 36, 157-66.

11. Helbling, E.W.; Villafañe, V.E.; Buma, A.G.J.; Boer, M.K. de. In situ impact of solar ultraviolet radiation on photosynthesis DNA in temperate marine phytoplankton. En: *Marine Ecology Progress Series*. s.l.: s.e., 2001. 211, 43-9.
12. Helbling, E.W.; Villafañe, V.E. UV radiation effects on phytoplankton primary production: a comparison between Arctic and Antarctic marine ecosystems. En: *Hessen, D. Ed. UV radiation and Arctic ecosystems. Ecological Studies*. s.l.: s.e., 2002. 153, 203-26.
13. Helbling, E.W.; Zaratti, F.; Sala, L.O.; Palenque, E.R.; Menchi, C.F.; Villafañe, V.E. Mycosporine-like amino acids protect the copepod *Boeckella titicacae* (Harding) against high levels of solar UVR. En: *Journal of Plankton Research*. s.l.: s.e., 2002. 24, 225-34.
14. Helbling, E. W.; Zagarese, H.E. *UV Effects in aquatic organisms and ecosystems* London: The Royal Society of Chemistry, 2003. --Comprehensive Series in Photochemistry and photobiology. (En prensa).
15. Kim, D.S.; Watanabe, Y. The effect long-wave ultraviolet radiation (UV-A) on the photosynthetic activity of natural population of freshwater phytoplankton. En: *Ecological Research*. s.l.: s.e., 1993. 8, 225-34.
16. Kirk, J.T.O. *Light and photosynthesis in aquatic ecosystems*. s.l.: Cambridge University Press, UK., 1994. 509.
17. Lazzaro, X. Biomasses, peuplements phytoplanktoniques et production primaire du lac Titicaca. En: *Revue D'hydrobiologie Tropicale*. s.l.: s.e., 1981. 14, 249-380.
18. Neale, P.J.; Richerson, P.J. Photoinhibition and the diurnal variation of phytoplankton photosynthesis – I. Development of a photosynthesis – irradiance model from studies of in situ responses. En: *Journal of Plankton Research*. s.l.: s.e., 1987. 9, 167-93.
19. Richerson, P.J.; Widmer, C.; Kittel, T. The limnology of Lake Titicaca (Peru-Bolivia), a large high altitude tropical lake. s.l.: University of California Davis, Institute of Ecology, 1977. 14, 78.
20. Richerson, P.J.; Neale, P.J.; Wurstbaugh, W.; Alfaro, R.; Vincent, W.F. Patterns of temporal variation in primary production and other limnological variables in Lake Titicaca, a high altitude tropical lake. En: *Hydrobiologia*. s.l.: s.e., 1986.138, 205-20.

21. Richerson, P.J.; Neale, P.J.; Alfaro, R.; Carney, H.J.; Lazzaro, X.; Vincent, W.F.; Wurtsbaugh, W. Patterns of planktonic primary production and algal biomass. En Dejour, C.; Iltis, A. Ed. Lake Titicaca. The Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 1992. 196-222.
22. Roy, S. Strategies for the minimization of UV-induced damage. En: De Mora, S.; Demers, S.; Vernet, M. The effects of UV radiation in the marine environment. s.l.: Cambridge University Press, UK, 2000, Cambridge Environmental Chemistry Series 10. 177-205.
23. Stolarski, R.; Bojkov, R.; Bishop, L.; Zerefos, C.; Staehelin, J.; Zawodny, J. Measured trends in stratospheric ozone. En: Science. s.l.: s.e., 1992. 256, 342-9.
24. Villafañe, V.E.; Andrade, M.; Lairana, F.; Zaratti, F.; Helbling, E.W. Inhibition of phytoplankton photosynthesis by solar ultraviolet radiation: studies in Lake Titicaca, Bolivia. En Freshwater Biology. s.l.: s.e., 1999. 215-24.
25. Villafañe, V.E.; Helbling, E.W.; Zagarese, H.E. Solar ultraviolet radiation and its impact on aquatic ecosystems of Patagonia, South America. En: Ambio. s.l.: s.e., 2001. 30, 112-77.
26. Vincent, W.F.; Neale, P.J.; Richerson, P.J. Photoinhibition: algal responses to bright light during diel stratification and mixing in a tropical alpine lake. En: Journal of Phycology. s.l.: s.e., 1984. 20, 201-11.
27. Zagarese, H.E.; Williamson, C.F. Impact of solar UV radiation on zooplankton and fish. En: De Mora, S.; Demers, S.; Vernet, M. The effects of UV radiation in the marine environment. s.l.: Cambridge University Press, UK, 2000. Cambridge Environmental Chemistry Series 10, 279-309.
28. Zaratti, F.; Andrade, R.; Forno, R.; Palenque, E.R. Longitudinal and latitudinal variations of the total ozone over the Central Andes. En: Il Nuevo Cimento, Sezione C 22. s.l.: s.e., 1999. 145-52.
29. Zaratti, F.; Forno, R.; Garcia, J.; Andrade, M. Erythemally weighted UV-B variations at two high altitude locations. s.l.: Journal Geophysical Research, Vol. 108, No. D9, 4263, 2003.

LOS EFECTOS DE LA RUV SOLAR SOBRE PLANTAS Y MATERIALES DE USO TECNOLÓGICO

Eduardo R. Palenque V.

Laboratorio de Física de la Atmósfera
Instituto de Investigaciones Físicas - UMSA
palenque@o3-bolivia.org

8.1. Introducción.

La creciente demanda de materiales más asequibles y fáciles de producir, ha logrado el desarrollo de un sin número de “nuevos” materiales de uso tecnológico. Muchos de ellos como los denominados plásticos comunes, están ampliamente difundidos en el planeta; no sólo como elemento de uso cotidiano, sino también por la facilidad de implementar plantas industriales, y también (lamentablemente) como un problema de índole ecológica por los crecientes niveles de contaminación que representan hoy en día.

De entre los denominados plásticos, los de uso más extendido son los polietilenos y los poliuretanos, ya que con la laminación de estos materiales se pueden tener “bolsas plásticas” de toda forma, tamaño y color; además que su bajísimo precio los ha hecho casi ideales para la producción y consumo masivo. Sin embargo, a pesar de su versatilidad (y el común uso efímero que se les da) aparecen varios problemas al tiempo de analizar el “ciclo de vida” del material.

El uso de películas plásticas como material de cubierta en invernaderos tiene una larga historia. Los criterios de elección de este tipo de material se basan en los factores de costo (las láminas de plástico son más baratas que las placas de vidrio), de aplicabilidad (los plásticos elegidos deben tener una transparencia a la luz visible mayor al 80%), de aislamiento (los plásticos son prácticamente opacos a la radiación infrarroja) y de facilidad de manipuleo (es muy fácil maniobrar con las láminas enrolladas). Sin embargo, durante el tiempo en que se ha utilizado estas cubiertas plásticas, se han destacado varios problemas relativos a la duración de las

mismas (1). Los problemas más comunes son los referidos a causas como la fuerte insolación y el ataque químico de los pesticidas utilizados en los interiores. La respuesta técnica ha sido el desarrollo y la producción masiva de cubiertas que incorporan unas sustancias especiales capaces de neutralizar, o postergar el daño específico (2).

Por otro lado, los cambios globales actuales, como el adelgazamiento de la capa de ozono, hacen prever un incremento de la intensidad de radiación ultravioleta que llega a la superficie del planeta. Independiente de los problemas que eso representa para la salud de las personas (véase los otros capítulos de este volumen), queda a ser considerada la cuestión de las plantas. Las plantas están fijadas a tierra, por lo que no tienen opción a disminuir la dosis de radiación solar que reciben. Si bien esto es beneficioso para el caso de la componente de la radiación útil para la fotosíntesis (radiación PAR), también se torna perjudicial en el caso de la componente ultravioleta. Se han estudiado algunos de los mecanismos de defensa en especies domesticadas y en variedades comúnmente utilizadas para producir alimento.

8.2. Antecedentes.

El altiplano andino presenta especiales condiciones de irradiación solar que lo califican como una de las regiones más soleadas del planeta (3) con valores medios de 850-890 W/m² y temperaturas medias menores a 15°C. Estas condiciones de irradiación contribuyen a un deterioro un tanto acelerado de las propiedades útiles de los plásticos de cubierta; en especial afecta a las propiedades mecánicas, convirtiéndolos en quebradizos y frágiles, y las propiedades ópticas, dejándolos blanquecinos y más opacos a la radiación visible.

Un caso similar se observa en el deterioro de la cubierta plástica de los cables conductores de electricidad que quedan expuestos a la radiación solar. En pocos meses se nota un deterioro tal que las cubiertas quedan rígidas y sumamente frágiles, además de perder su coloración. Entonces, para poder utilizar los materiales plásticos en un ambiente tan hostil al material, se hace indispensable el reforzamiento del mismo. Para el caso de las cubiertas para invernaderos, la respuesta de la industria fue desarrollar una serie de plásticos específicamente diseñados para resistir la solarización, y que llegan al mercado bajo diversos nombres comerciales como Agrofilm® , Fititrón®, Luminal-4®, etc. Es necesario destacar que si bien todos estos nombres comerciales tienen el mismo tipo de estructura molecular básica,

basada en el polietileno, la composición y estructuras finales varían de acuerdo a la fábrica, en lo que se considera parte de los "secretos" del gremio.

Los estudios realizados sobre la solarización del Agrofilm® en el Laboratorio de Física de la Atmósfera (LFA) de la Universidad Mayor de San Andrés (UMSA) (4) se realizan bajo dos hipótesis de trabajo. Estas son necesarias porque, debido a la tendencia protectora de los industriales hacia la difusión de la manera en que se elaboran los productos, queda la interrogante sobre si las sustancias adicionales puestas a la matriz de polietileno quedan incorporadas a ésta, o mas bien se trata de una especie de solución sólida del aditivo en el polímero. Los ensayos de laboratorio indican que ambas situaciones están presentes.

Ambas situaciones son perfectamente compatibles con los procesos observados durante la solarización de los plásticos utilizados en los experimentos. El relativo exceso de radiación ultravioleta solar (5) que reciben las cubiertas de invernadero en el altiplano y que se explica por las condiciones climáticas y ambientales, hace que las cubiertas plásticas, cuya base es el polietileno, sufran un proceso de cristalización de cadena y pérdida de grupos secundarios (6,7). La combinación de estos procesos da como resultado el "envejecimiento" de la película plástica, y que conlleva al descarte de la misma, ya que deja de tener las propiedades por las que fue elegida, a saber: la resistencia a los vientos y la transparencia a la luz, en especial a la PAR.

El extensivo uso del Agrofilm® para cubiertas de invernadero conlleva la pregunta de cómo afectarían los cambios de las propiedades ópticas del material a los cultivos desarrollados en los invernaderos. En particular, nos interesan los cambios producidos tanto en la región ultravioleta del espectro electromagnético, como en la parte visible del mismo. Hace algunos años se ha probado que un exceso de la radiación UV-B afectaría en forma negativa al desarrollo de las plantas (8,9,10) por lo que la solarización dejaría a la cubierta como elemento inefectivo para la protección adicional que las plantas cultivadas en su interior requieren (11). También se ha probado que las altas dosis de radiación UV solar afecta a la fisiología del plancton (12), como se analiza en el cap. 7 de este mismo libro.

8.3. Los modelos.

Los estudios sobre la solarización de materiales llevados a cabo en el LFA, han demostrado que la RUV no sólo afecta a las propiedades ópticas de las películas plásticas, como se puede apreciar en la figura 8.1, sino también a sus propiedades me-

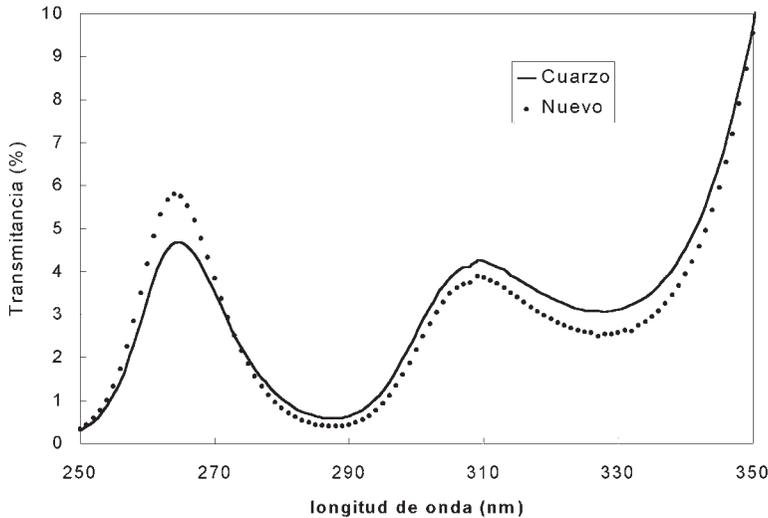


Figura 8.1 Transmitancia del Agrofilm® relativa al aire, las curvas se pueden ajustar a polinomios de cuarto grado. La curva marcada "cuarzo" corresponde a una muestra irradiada a través de una lámina de cuarzo, que permite el paso de la RUV, pero le daba protección ante una posible corrosión.

cánicas. El hecho que aparezca una variación en la transmitancia del Agrofilm® en la región ultravioleta, se puede explicar por la paulatina pérdida de las sustancias "protectoras" del mismo. En el caso estudiado, estas sustancias son derivados directos de la Ni/benzofenona, la cual es adicionada durante el proceso de laminación del plástico. El primer modelo de pérdida de la Ni/benzofenona sugiere que esta sustancia está disuelta en la matriz polimérica, y que por absorción de energía solar en la banda característica de los anillos alifáticos, se descompone y desprende como productos de reacción. De esta manera se explica el desgaste paulatino del material a lo largo del tiempo de exposición, tal como se observa en la figura 8.2. El segundo modelo, considera que las moléculas del aditivo se han enlazado (directamente o mediante algún mordiente) con las cadenas del polímero. En este caso, se supone que la solarización produce la ruptura de los enlaces de sujeción, y las capas moleculares superficiales se van tornando transparentes a la RUV.

La pérdida de la plasticidad y su paulatino reemplazo por una rigidez que lleva a la fragilidad se interpreta en términos del crecimiento de las zonas cristalinas dentro del polímero. El tipo de tratamiento termo-mecánico al cual es sometido el material para ser producido como lámina, tiene como subproducto, la creación de pequeño porcentaje de material cristalino dentro de la matriz polimérica. Este es el modelo de micela cristalina (13), que está esquematizado en la figura 8.3.

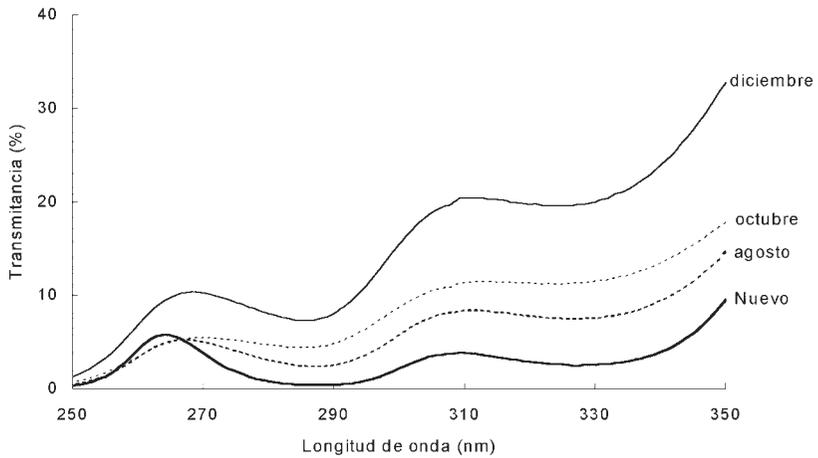


Figura 8.2. Evolución temporal de la transmitancia del Agrofilm®. Las curvas corresponden a tres meses de irradiación, aproximadamente 0,5 MJ.

La prolongada exposición de las películas plásticas a la radiación solar, no sólo produce un incremento en la transparencia a la radiación ultravioleta y un aumento de la opacidad para el rango visible, sino que también disminuye (en forma drástica) la resistencia mecánica de las películas. Esta transformación le quita el carácter plástico al polímero y produce grandes inconvenientes, ya que el material deja de soportar las tensiones producidas por los vientos y, literalmente, se hace tiras. Atribuimos esta pérdida de resistencia mecánica al desarrollo de mayor número de zonas cristalinas (micelas) y a un incremento en

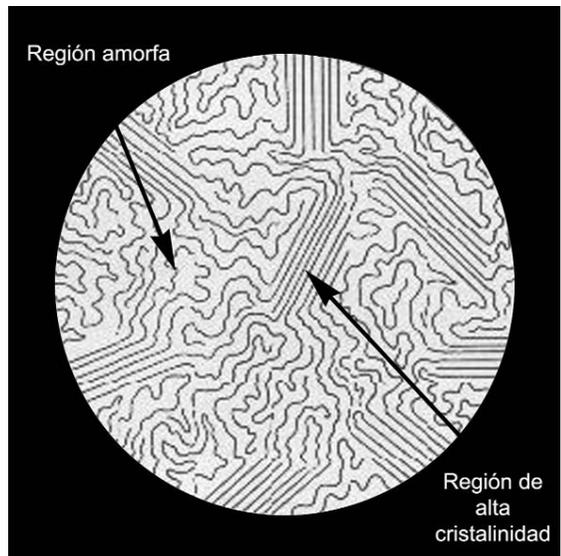


Figura 8.3. Modelo de micela cristalina dentro de la matriz polimérica del material. Adaptado de Wullf et al. Ref. 13.

el tamaño de las mismas. Es ampliamente conocida la diferencia de comportamiento mecánico de los materiales plásticos, que tienden a fluir ante un esfuerzo de tracción, y los cristalinos, que tienden a fracturarse. Las láminas solarizadas presentan una marcada tendencia hacia el segundo caso.

Se podría esperar que los materiales de cubierta de las plantas presenten un fenómeno parecido. Hasta el momento no está demostrada la presencia de microcapas cristalinas sobre las hojas de las plantas, pero, la composición cérica de muchas de ellas, hace pensar que tal fenómeno es posible.

Las plantas, como seres vivos, interactúan con el ambiente, en este caso contra el exceso de radiación, tratando de proteger la información genética. La estrategia es conceptualmente simple, pero fisiológicamente compleja: se generan una serie de sustancias “extras” que tornan al citoplasma más opaco ante la UV. Entre estas sustancias se han encontrado familias enteras de carotenoides y flavonoides (14).

Un mecanismo similar ha sido ya identificado en el plancton del Lago Titicaca, como estrategia defensiva ante las (comparativamente) enormes dosis que los organismos reciben en el ambiente altiplánico (12). En el caso de la quinua, y de otros vegetales domesticados para la producción de alimentos, la formación de estas sustancias protectoras, similares a la melanina cutánea de las personas, es una causa de desvío de recursos alimenticios y energéticos para la planta. El resultado final es que, en las plantas que reciben mayor cantidad de RUV, los frutos maduran un poco más tarde y las plantas tardan más en llegar a su altura de desarrollo. Pero, además, los frutos contienen una menor cantidad de azúcares y proteínas, en otras palabras, son de menor calidad.

8.4. Resultados.

Se ha estudiado con más detalle los cambios en las propiedades ópticas, en especial la transmitancia como función de la longitud de onda de las películas de Agrofilm®. En la figura 8.1 se puede apreciar el cambio del comportamiento óptico del Agrofilm® ante una dosis acumulada. Se comparan las curvas correspondientes a una muestra “nueva”, es decir, sin haber sido expuesta a ningún tipo de RUV, con una muestra expuesta ante 1 MJ, que equivale a un poco más de seis meses en el altiplano. Para aislar los efectos de la solarización de otros, como la corrosión, y que también pudieran afectar la transparencia del material, la muestra expuesta al sol estuvo cubierta por una placa de cuarzo. Este material permite el paso de toda

la radiación visible y ultravioleta. Este tipo de experimentación controlada, nos permite asegurar que el efecto observado se debe exclusivamente a la radiación solar. Un segundo lote de muestras estuvo sometido al mismo tratamiento de solarización pero con una cubierta de vidrio, que absorbe la parte UV del espectro solar y deja pasar la visible. Así separamos los efectos de la componente visible de la ultravioleta.

La figura 8.2 muestra la paulatina degradación que va sufriendo el Agrofilm® por la exposición al sol. Las curvas de arriba hacia abajo corresponden a medidas realizadas con intervalos de tres meses. Es notorio el envejecimiento del material. De la correlación de la energía de las bandas de absorción y los picos mostrados en estos gráficos, se puede concluir que el envejecimiento se desarrolla en dos etapas: al comenzar la solarización, se van perdiendo las moléculas de los derivados de la benzofenona, y luego es la propia matriz polimérica la que queda dañada.

Para cuantificar el proceso, se realizó primero un ajuste a las curvas de transmitancia vs. longitud de onda, obteniéndose una serie de polinomios de cuarto grado con discrepancias menores al 0.5 %. Luego, se realizó un ajuste a los coeficientes de esos polinomios como función de la dosis acumulada recibida. Esta dosis es un función casi lineal del tiempo de exposición. El resultado final es una ecuación parabólica :

$$y = 1.30x^2 - 3.17x + 2.30$$

donde “y” representa el valor de la mantisa de los coeficientes numéricos de la función de ajuste de la curva de la transmitancia como función de la longitud de onda, y x representa la dosis acumulada recibida, en MJ/m².

El comportamiento óptico observado se puede entender al considerar la dosis de 1 MJ/m² como el umbral en el cual los enlaces ramificados que sujetan a las benzofenonas, ya no logran retenerlas, éstas se liberan, y dejan la cadena central sin protección ante la RUV-B, la cual produce una sistemática cristalización del material.

Debido a la gran variabilidad de la respuesta de las plantas como organismos vivos, las curvas de respuesta no mantienen un mismo comportamiento ante diversas dosis recibidas, por lo que no se tiene un ajuste realizado sobre la concentración de cromóforos protectores (figura 8.4).

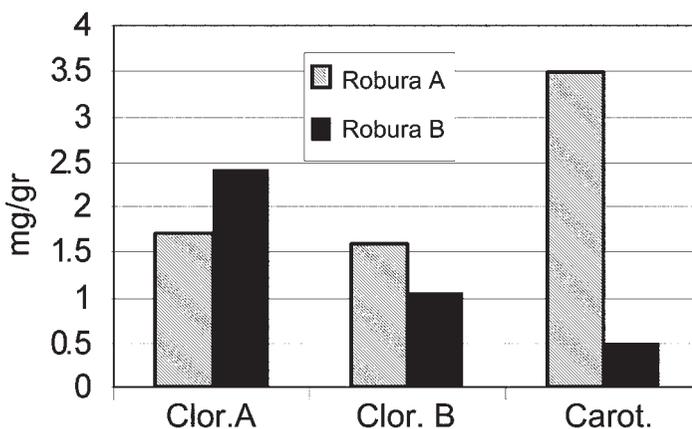


Figura 8.4 Concentración de los cromóforos (clorofila tipo A, clorofila tipo B, Carotenoides) entre plantas de quinua de la variedad "robura". El lote marcado como A recibió la dosis total de RUV, el lote B quedó protegido.

BIBLIOGRAFÍA CONSULTADA CAPÍTULO 8

1. Angulo, J. L. Caracterización físico – química de polímeros. México DF: Limusa – Noriega editores, 1999.
2. Garnauld. C. Memorias del XII Congreso internacional de plásticos en la agricultura: resumen del congreso. Granada, España: s.e., 3 – 8 Mayo 1996 .
3. Palenque, E. R. et al. Efectos de la radiación ultravioleta (RUV) sobre materiales tecnológicos, resultados preliminares: informe de labores. La Paz: Instituto de Investigaciones Físicas, UMSA, 1998.
4. Palenque, E R. et al. Efectos de la radiación ultravioleta sobre el desarrollo de la quinua (*Chenopodium Quinoa*, Willd). En: Revista Boliviana de Física. La Paz: s.e., (1997). 3, 120.
5. Palenque, E. R. Efectos de la RUV sobre materiales tecnológicos. En: Memorias del seminario sobre la naturaleza efectos de la capa de ozono y la radiación ultravioleta. La Paz: s.e., 18 – 21 de septiembre 1996.

6. Palenque, E. R. Respuesta de variedades de quinua ante incrementos de la radiación ultravioleta solar. En: Aguirre, C. et al, eds. En: Memorias del Simposio Internacional sobre el sistema del Lago Titicaca. La Paz: s.e., 7 al 11 de Mayo del 2001.
7. Saravia, I. et al. Red solarimetrica boliviana, publicación interna del instituto de investigaciones físicas, UMSA, La Paz: s.e., 1998.
8. Searles, P. S.; Cadwell, M. M.; Winter, K.. Am. J. Botany. S.l.: s.e., (1995). 82 (4), 445.
9. Takayanagi, Sh. et al. Alfalfa seedlings grown outdoors are more resistant to UV – Induced DNA damage than plants grown in a UV_free environmental Chamber. En: Photochemistry and Photobiology. s.l.: s.e., (1994). 60 (4), 363.
10. Tevini, M.; Teramura, A.H. UV–B effects on terrastrial plants. En: Photochemistry and photobiology. s.l.: s.e., (1989). 50 (4), 479.
11. Torres, R.; Blacutt, L.A. Magnitud de los componentes UVA y UVB de la radiación solar en Cota – Cota. En: Agollo, J.; Miranda, G. eds. Memorias del simposio nacional de cambios globales. La Paz: s.e., 21- 3 de junio de 2000.
12. Wulff, J. et al. Ciencia de los materiales. Propiedades mecánicas Vol. III. México DF: Ed. Limusa, 1968.
13. Zabeltitz. Ch. Von. Los nuevos avances en los plásticos para invernaderos. Memorias del XII Congreso Internacional de plásticos en la agricultura, Granada, España: s.e., 3–8 mayo 1996.

PARTE C

**ASPECTOS SOCIALES
Y LEGALES**

FOTOPROTECCIÓN SOLAR

Ricardo Forno

Laboratorio de Física de la Atmósfera – IIF-UMSA
rforno@o3-bolivia.org

9.1. Introducción.

Si bien el primer paso que se debe tomar para evitar daños causados por la radiación solar es evitar exposiciones innecesarias y, principalmente, evitar exponerse al sol entre las 10 am y las 3 pm, existen diferentes mecanismos de protección que permiten cuidar nuestra salud en relación a la radiación solar.

En este capítulo se describirá brevemente los mecanismos de protección solar, los factores de protección solar (FPS o en inglés SPF) que caracterizan a los bloqueadores solares, los bronceadores, las camas solares y, adicionalmente, se dará algunas recomendaciones generales para una mejor fotoprotección.

Se puede clasificar a los mecanismos de fotoprotección solar en dos grupos:

- el primero comprende todos los mecanismos naturales mediante los cuales el cuerpo humano se protege de la radiación solar. Dentro de esta categoría se encuentran la melanina, el sudor y el aumento de grosor de la capa córnea. Los mecanismos naturales de fotoprotección no son controlados de un modo directo por las personas ya que son respuestas fotobiológicas del organismo.
- el segundo grupo, que será descrito con algún detalle en los próximos párrafos, comprende a los fotoprotectores artificiales.

9.2. Fotoprotectores artificiales.

Los fotoprotectores artificiales son productos que absorben, reflejan o dispersan la radiación ultravioleta solar con el fin de proteger la piel o los ojos de las personas.

De acuerdo al mecanismo general mediante el cual cumplen su función protectora, se los suele dividir en tres grupos: fotoprotectores tópicos, sistémicos y externos.

9.2.1. Fotoprotectores tópicos.

Los fotoprotectores tópicos son drogas que protegen la estructura y función de la piel contra los daños causados por la radiación solar. Estas drogas son empleadas solas o en combinación con lociones, cremas, geles, barras labiales o sprays, conformando una gran variedad de productos denominados filtros o bloqueadores solares cuyo uso es tópico (no se los ingiere).

Es común clasificar a los fotoprotectores tópicos en dos grupos:

- *Filtros o bloqueadores solares de barrera o físicos*

Una de las principales características de este tipo de bloqueadores es que no absorben selectivamente la radiación ultravioleta. Son aplicados en forma de una delgada capa sobre la piel y reflejan o dispersan la RUV y la radiación visible en función del tamaño de las partículas (tipo de compuesto) y del espesor de la película aplicada.

Las sustancias más comunes empleadas para hacer bloqueadores de barrera son el óxido de zinc, el dióxido de titanio, el trisilicato de magnesio (talco), el Kaolin, el petrolato rojo y los óxidos de acero.

Al no poseer sustancias químicas “activas”, los bloqueadores solares de barrera tienen la ventaja de no causar reacciones alérgicas, sin embargo, por su naturaleza oclusiva, pueden causar acné, foliculitis y urticaria solar. Por otro lado, su uso no es frecuente por no favorecer a una adecuada cosmética y, típicamente, se limita, en el mejor de los casos, a aplicaciones en regiones muy sensibles (nariz, orejas y labios). Actualmente esta situación está cambiando ya que recientemente se han desarrollado preparaciones de dióxido de titanio y óxido de zinc extremadamente finas, a tal punto que son prácticamente invisibles sobre la piel. Los productos que solamente tienen bloqueadores físicos usualmente son etiquetados como “chemical free”.

- *Filtros o bloqueadores solares Químicos*

Los bloqueadores solares químicos actúan absorbiendo la radiación ultravioleta en determinadas longitudes de onda (bandas espectrales). Las características

específicas de la absorción de un determinado bloqueador dependen, en primera instancia, de los compuestos químicos empleados en el producto (el agente). Por ejemplo, la figura 9.1 muestra la absorción espectral para diferentes concentraciones del Ethylhexyl Salicylate, una de las sustancias utilizadas en la elaboración de bloqueadores solares. Como se puede apreciar en la figura 9.1, esta sustancia no absorbe en un 100% ninguna de las longitudes de onda de la banda ultravioleta. Es importante destacar que ninguna de las sustancias empleadas en los bloqueadores químicos absorben un 100% de la UV, más aún, cuánto absorben y cómo absorben depende de varios factores, entre los cuales vale la pena mencionar: la sustancia empleada como agente, la concentración de la sustancia y el tiempo de exposición de la sustancia al sol.

Puesto que las sustancias empleadas son prácticamente transparentes en el visible, resultan cosmetológicamente bien aceptadas, sin embargo, algunas pueden causar alergias e irritaciones de la piel. En particular, sustancias como el ácido para-aminobenzoico (PABA) han sido descartadas en algunos países por su efecto alergénico.

Dependiendo del tipo de agentes empleados, esos compuestos pueden absorber eficientemente la UV-A, la UV-B o ambas bandas de radiación. Por ejemplo, el ácido para-aminobenzoico absorbe con eficiencia la UV-B pero no la UV-A. En la tabla 9-1 se puede apreciar las sustancias empleadas con mayor frecuencia como agentes en los protectores solares.

- *Resistencia al agua*

Un factor que es importante considerar al aplicarse un bloqueador solar es su capacidad de

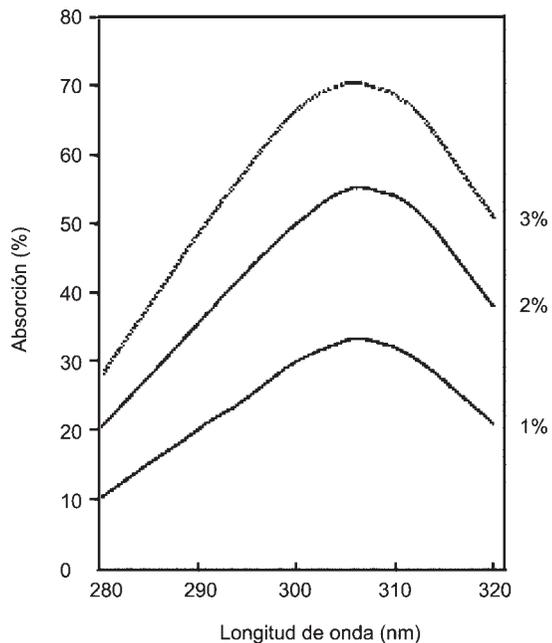


Figura 9.1 Absorción (en %) de la radiación por el Ethylhexyl Salicylate en soluciones al 1,2 y 3%. Espesor de la muestra: 0.01 mm.

permanecer sobre la piel al entrar en contacto con un medio húmedo (agua de piscina, sudor, agua de mar, etc.). La tolerancia del bloqueador al agua depende principalmente de su excipiente y mejora notablemente con la inclusión de algunos derivados acrílicos.

Tabla 9-1

Agentes empleados para la elaboración de bloqueadores solares tópicos

Tipo	Agente	Conc %
Para UV-B		
Acido para-aminobenzoico y derivados	PABA	5
	Amil dimetil PABA (padimato A)	1 – 5
	Étil-4-bis (hidroxipropil)-1-aminobenzoato	1 – 5
	Gliceril p-aminobenzoato	2 – 3
	Octil dimetil PABA (padimato O)	1.4 – 8
Derivados del ácido cinámico	2-Etoxietil p-metoxicianato (cinoxato)	1 – 3
	Dietanolamina p-metoxicianato	8 – 10
	2-Etil hexil p-metoxicianato (octil metoxicianato, Parsol MCX)	2 – 7.5
Derivados del ácido salicílico	Homosalato	4 – 15
	Octil salicilato (2-etilhexil salicilato)	3 – 5
	Trietanolamina salicilato	5 – 12
Misceláneos	Digalloil triolato	2 – 5
	Octocrilano (2-etilhexil-2-ciano-3, 3difenilacriato)	7 – 10
	Ácido 2-Fenilbenzimidazole-5-sulfonic	1 – 4
Tipo	Agente	Conc %
Para UV-A		
Derivados de la Benzofenona	Dioxibenzona	3
	Oxibenzona	2 – 6
	Sulisobenzona	5 – 10
Derivados del ácido antranílico	Metil antranilato	3.5 – 5
Derivados del dibenzoilmetano	Butil metoxidibenzoilmetano (Parsol 1789, avobenzona)	2 – 3
Misceláneos	Terephthalylidene dicanphor sulfonic acid (Mexoril SX)	0.5 – 10

Existen dos clasificaciones posibles para los productos resistentes al agua:

- *Resistente al agua (water resistant).*- Cuando mantiene su capacidad protectora luego de 40 minutos de natación.
- *A prueba de agua (waterproof).*- Cuando mantiene su capacidad protectora luego de 80 o más minutos de natación.

9.2.2. Fotoprotectores sistémicos.

Los fotoprotectores sistémicos se emplean cuando hay alteraciones en la fotosensibilidad de un individuo, por lo tanto, su empleo requiere el análisis de un especialista. A continuación se describirá brevemente el efecto de algunos compuestos empleados como fotoprotectores sistémicos.

Acido retinoico: Es un fármaco empleado en el tratamiento y prevención del fotoenvejecimiento. Se usan dosis progresivas entre 0.025 a 0.1 % en cremas.

Beta – carotenos: Estos compuestos, contenidos en verduras y frutas, absorben parcialmente la luz visible entre 360 y 500 nanómetros y son empleados en pacientes con porfiria eritropoyética y porfiria variegata. Su administración es vía oral y, en combinación con bloqueadores solares, puede aumentar la tolerancia al sol.

Antipalúdicos: Algunos compuestos antipalúdicos, por ejemplo la cloroquina, pueden fortalecer el mecanismo de producción de melanina (nuestro protector solar natural). Sin embargo, su empleo es delicado por los posibles efectos oftalmológicos secundarios.

Melagenina: Este compuesto tiene lipoproteínas que estimulan la síntesis y proliferación de melanocitos (ver capítulo 5).

9.2.3. Fotoprotectores externos.

El uso de fotoprotectores externos como sombreros, ropa adecuada y eventualmente, si la actividad del individuo lo requiere, lentes de sol es muy recomendable. En términos generales, los fotoprotectores externos son más importantes que los fotoprotectores tópicos y sistémicos.

- *Lentes de sol*

Existen en nuestro mercado una gran variedad de lentes de sol. Las personas pueden adquirirlos con gran facilidad, bien sea con el objetivo de protegerse de la intensa radiación visible de la zona andina o simplemente con el afán de mejorar su estética personal. Sin embargo, antes de usar estos lentes, es recomendable reflexionar sobre algunos aspectos importantes:

a) ¿Para quienes están recomendados los lentes de sol?

Al igual que la piel, los ojos pueden sufrir daños considerables debido a la radiación solar, por lo tanto, el empleo de lentes de sol, en términos generales, es recomendable cuando una persona se expone a dosis elevadas de radiación solar.

b) ¿Cuáles son los lentes de sol adecuados?

Lamentablemente, en Bolivia el comercio de lentes de sol no contempla ningún tipo de regulación. Cuando un individuo compra lentes de sol, normalmente lo hace sin un seguimiento o recomendación de un especialista y, además, no tiene certeza de que éstos filtren adecuadamente la radiación ultravioleta (tanto la UV-A como la UV-B).

Es importante advertir que no hay que dejarse engañar por el color de los lentes; por ejemplo, algunos lentes transparentes filtran completamente la radiación ultravioleta mientras que otros, muy oscuros a simple vista, no filtran adecuadamente esta peligrosa radiación.

El empleo de lentes de sol inadecuados es muy dañino para los ojos ya que, debido a que filtran un buen porcentaje de la radiación visible, nuestras pupilas se dilatan (como nos ocurre en la oscuridad) y, por lo tanto, la radiación ultravioleta no filtrada por los lentes puede penetrar con mayor facilidad. En todo caso, a la hora de comprarse lentes de sol, es recomendable hablar con un especialista.

Tabla 9-2

Factores de protección solar para diferentes sombreros y en diferentes regiones del cuerpo (Diffey-Cheeseman, 1992)

Tipo de sombrero	frente	nariz	mejilla	mentón	detrás del cuello
Ala pequeña (< 2,5 cm)	15	1.5	1	1	1
Ala media (de 2,5 a 7,5 cm)	> 20	3	2	1	1
Ala grande (> 7,5 cm)	> 20	7	3	1.2	5
Gorra	> 20	5	1.5	1	1

- *Sombreros*

Por motivos económicos y por la ausencia de compuestos químicos, el sombrero es la primera opción para proteger el rostro y el cuello de un individuo.

La efectividad con la cual un sombrero bloquea la radiación ultravioleta depende principalmente del tamaño y forma del ala del mismo. En la tabla 9.2 se muestra el factor de protección solar de diferentes sombreros y en diferentes partes del cuerpo. Vale la pena resaltar el hecho de que ningún sombrero nos protege 100% de la radiación ultravioleta ya que los sombreros solamente bloquean la radiación directa del sol y no así la difusa (la que viene de todas partes del cielo) ni la reflejada (albedo). Por lo tanto, es recomendable que se complemente el uso de sombreros con bloqueadores solares cuando la actividad del individuo lo requiera.

- *Telas y vestimenta*

Para una eficiente protección solar sobre todo el cuerpo es importante el uso de vestimenta adecuada. Dentro lo posible, es recomendable utilizar vestimenta que cubra la mayor cantidad de piel posible, por ejemplo, camisas de manga larga y pantalones. Adicionalmente, la protección que nos brinda la vestimenta depende del material con el cual fue confeccionada la misma:

Color.- Mientras más oscuro sea el color de la tela mayor será la protección a la radiación ultravioleta; sin embargo, los tejidos oscuros absorben con mayor eficiencia la radiación visible e infrarroja teniendo como resultado mayor calor.

Estructura del tejido (este es uno de los factores más importantes).- Mientras más tupido sea el tejido (distancia entre las hebras), mayor protección a la radiación se tiene.

Grosor.- Mientras más grueso sea el tejido mayor será la protección

Elasticidad.- Un tejido elástico puede perder considerablemente su factor de protección solar a medida que se lo estira.

Humedad.- La influencia de la humedad en el FPS de un tejido varía según el tipo de fibra empleada, por ejemplo, los tejidos de algodón disminuyen su FPS cuando están mojados mientras que los tejidos de poliéster, en las mismas condiciones, lo incrementan.

Tipo de fibra.- Cada tipo de fibra tiene un comportamiento particular en cuanto a su capacidad de absorber, reflejar o transmitir la radiación ultravioleta. En términos generales se puede decir que los tejidos hechos con nylon y algodón tienen un FPS mayor que los de poliéster.

9.3. Factores de protección solar (FPS).

Como ya se mencionó en los párrafos anteriores, existen bloqueadores solares elaborados con diferentes sustancias y con diferentes concentraciones de esas sustancias proporcionando, de esta manera, una amplia gama de grados de protección. El grado de protección de un determinado producto se especifica mediante el Factor de Protección Solar (FPS). El FPS se define como la razón entre la energía requerida para producir un eritema mínimo (enrojecimiento de la piel) empleando el bloqueador y la energía requerida para producir el mismo eritema sin el uso del bloqueador. Por ejemplo, en términos prácticos, si una persona puede permanecer al sol sin emplear el bloqueador solar durante 15 minutos antes de sufrir un enrojecimiento de la piel, el mismo individuo, empleando un bloqueador con un FPS = 4 podría permanecer 4×15 minutos, es decir 1 hora. Es importante destacar que un protector solar determinado tendrá diferente efecto en personas con diferente tipo de piel.

Un bloqueador con un FPS = 15 permite que $1/15$ de la radiación ultravioleta penetre a la piel, en otras palabras, bloquea un 93% de esta radiación; del mismo modo, un bloqueador con un FPS = 30 bloqueará un 97% y uno con FPS = 60 bloqueará 98.

El valor del Factor de Protección Solar de un producto es determinado en laboratorio en condiciones ideales (no hay viento, no hay lluvia, no cambia la temperatura, etc.). Se emplea para tal propósito, una lámpara que simula la luz del sol y se aplica 2 mg/cm^2 del protector solar a la piel. En la práctica, los reportes indican que las personas se aplican cantidades de bloqueador solar inferiores a las recomendadas por el fabricante, disminuyendo la eficiencia del bloqueador hasta en un 50 %. Aproximadamente se necesita 30 ml de bloqueador para cubrir adecuadamente a una persona promedio y obtener, de esta manera, el FPS reportado por el producto.

9.4. Bronceadores.

Para acelerar la pigmentación cutánea o simplemente teñir la piel, se han desarrollado productos para su aplicación tópica (en la superficie de la piel); estos productos pueden dividirse en dos grupos: bronceadores sin sol o bronceadores con sol.

En el primer grupo, el de los bronceadores sin sol, se suele emplear diversas sustancias naturales que proporcionan a la piel una coloración semejante a la producida por el efecto bronceador de la radiación ultravioleta. Sustancias como los óxidos de hierro, el extracto de cáscara de nuez o de castaño, el permanganato de potasio o soluciones de taninos, cumplen adecuadamente con el objetivo deseado. Adicionalmente se emplean sustancias sintéticas como la dihidroxiacetona, la cual reacciona con algunos compuestos de la piel y produce compuestos de color oscuro.

Si bien los compuestos citados anteriormente desarrollan un bronceado artificial, no contribuyen a la protección solar de un modo directo ya que no filtran la radiación ultravioleta, sin embargo, el hecho de adquirir un bronceado rápido, como es el caso, previene la exposición excesiva de la persona al sol.

En el segundo grupo, el de los bronceadores con sol, existen algunos productos que, bajo la acción de la radiación ultravioleta (UV-A y UV-B) aceleran la pigmentación cutánea o bronceado. El mecanismo mediante el cual funcionan los mencionados productos se basa en la absorción de radiación ultravioleta y la generación de una reacción fototóxica que se manifiesta con hiperpigmentación.

Entre las sustancias más empleadas para la elaboración de estos productos bronceadores se encuentran las furocumarinas o psoralenos, sin embargo, debido a sus posibles efectos secundarios (alteraciones de la fórmula hemática o inducción de cáncer) su uso está actualmente en discusión.

9.5. Camas y lámparas bronceadoras.

Las primeras generaciones de camas y lámparas bronceadoras empleaban radiación ultravioleta B (UV-B) pero, debido al potencial daño que la radiación ultravioleta B puede generar en la piel, los ojos y el sistema inmunológico, se descartó su uso y se optó por el empleo de fuentes de radiación ultravioleta A (UV-A).

Si bien el empleo de la radiación UV-A con el objetivo de broncear aun puede causar daños considerables, ya que el espectro de acción carcinogénico se extiende (en menor proporción) dentro de la banda radiación UV-A, el bronceado artificial con camas y lámparas bronceadoras modernas no es tan dañino como lo era antes. Sin embargo, no hay que olvidarse que el riesgo aún persiste y que la Organización Mundial de la Salud (OMS) no recomienda su empleo para fines cosméticos. Por lo tanto, en caso de emplear dispositivos bronceadores artificiales, es conveniente informarse y tomar en cuenta las recomendaciones dadas por el fabricante con mucha precisión.

9.6. Recomendaciones generales en fotoprotección.

Algunas recomendaciones generales relacionadas a la fotoprotección son las siguientes:

- Evitar exposiciones al sol innecesarias y, principalmente, evitar exponerse al sol entre las 10 am y las 3 pm.
- Emplear vestimenta adecuada para protegerse de la radiación solar (sombros, camisas de manga larga y, eventualmente lentes de sol)
- Tener en mente que los bloqueadores solares no han sido diseñados para aumentar el tiempo de exposición al sol sino para disminuir los daños causados por una exposición normal.
- Hay que proteger con particular cuidado a los niños ya que su piel es más delicada.
- Es importante leer con cuidado las indicaciones de los protectores solares y aplicar el producto de acuerdo a las especificaciones indicadas.
- Si el uso de un determinado producto causa alergia o irritación de la piel se tiene que suspender las aplicaciones.
- En el caso de la natación u otras actividades que pongan en contacto al bloqueador con agua o sudor se debe emplear bloqueadores adecuados para tal propósito.
- En pieles muy delicadas es recomendable consultar con un especialista.
- El uso de camas y lámparas bronceadoras no es recomendable para fines cosméticos.

BIBLIOGRAFÍA CONSULTADA CAPITULO 9

1. Diffey, B.L., Sun Protection: have we gone yoo far? letter. En: Br. J. Dermatol. s.l.: s.e., 1998. 138, 562-3.
2. Forno, R.; Andrade, M. Memorias del seminario naturaleza y efectos de la radiación ultravioleta. La Paz: Instituto de Investigaciones Físicas, UMSA, 1997.
3. Rubin, J.; Arroyo, G.; Iribarren, N.A. El factor de protección solar, estudio critico. En: Cosmética. s.l.: s.e., 1988. 3: 8, 19.
4. Sanna , G.; Pellatt, Bsc. (Pharm). Prevention of skin cancer. En: Highlights in oncolgy practice. Vol. 17, No. 1. s.l.: s.e., 1999.
5. World Health Organization. Ultraviolet radiation, Geneva: WHO, 1994. (Environmental Health Criteria 160).

EL ÍNDICE ULTRAVIOLETA (IUV)

Luis Alberto Blacutt

Laboratorio de Física de la Atmósfera, IIF-UMSA
lucho@o3-bolivia.org

10.1. El índice UV, un parámetro para la población.

El índice de radiación ultravioleta (IUV) es un indicador de la intensidad de RUV recibida. Está recomendado como un medio para hacer que la población tome conciencia sobre los efectos negativos que tiene la radiación solar ultravioleta (RUV) en la salud y para alertar a la población sobre la necesidad de adoptar medidas de protección. Existen variables medioambientales, como las nubes o los aerosoles en suspensión, que son factores modificadores.

El IUV se define para una superficie horizontal, sin embargo las condiciones para una superficie inclinada son más importantes para la exposición humana a la radiación ultravioleta (RUV).

En un inicio el IUV se formuló independientemente en varios países, pero finalmente su definición se ha estandarizado y se ha publicado como una recomendación conjunta de la Organización Mundial de la Salud (OMS), la Organización Meteorológica Mundial (OMM), el Programa Medioambiental de las Naciones Unidas (UNEP) y la Comisión Internacional de Radiación No-ionizante bajo los siguientes criterios.

1. Utilizar el espectro de acción de la Comisión Internacional de Iluminación (CIE, por sus siglas en francés).
2. Se requiere que al menos se reporten valores de irradiancia efectiva a la hora del mediodía solar local.
3. El IUV se estimará multiplicando el valor de la irradiancia efectiva, en W/m^2 por 40, y se propone que el valor de la irradiancia efectiva sea el valor máxi-

mo del día, obtenido del promedio de mediciones realizadas en periodos de 10 a 30 minutos.

Así si el IUV es 1 (uno), éste tiene una equivalencia de $1/40 \text{ W/m}^2$, si es dos la equivalencia será $2/40 \text{ W/m}^2$; es decir:

IUV	Valor W/m^2	IUV	Valor W/m^2
1	0.025	9	0.225
2	0.050	10	0.250
3	0.075	11	0.275
4	0.100	12	0.300
5	0.125	13	0.325
6	0.150	14	0.350
7	0.175	15	0.375
8	0.200	16	0.400

Ahora bien es importante determinar cuál es la reacción sobre la piel; es decir, cuánto tiempo una persona puede exponerse al sol de manera «segura», se entiende por manera «segura» cuando no se produce un eritema, se denomina eritema al primer enrojecimiento de la piel que es debido a una excesiva exposición a la radiación solar ultravioleta.

Cuando una persona se expone a la radiación solar recibe energía que en el transcurso del tiempo se acumula hasta producir el eritema. Debido a este motivo debemos distinguir entre los términos de irradiancia y dosis recibida.

Entendemos la irradiancia como la cantidad de energía que incide sobre una superficie de 1m^2 por unidad de tiempo. Sus unidades son W/m^2 o similares; como podemos ver, se trata de unidades de potencia por unidad de superficie.

Por otro lado, la dosis es la cantidad de energía (total o acumulada) que incide sobre una superficie unitaria, las unidades son de energía por unidad de superficie J/m^2 o similares. Según el tiempo de exposición, se habla de dosis diaria, horaria, etc.

10.1.1. Irradiancia Efectiva o Biológicamente Ponderada.

Los procesos fotobiológicos y fotoquímicos responden de manera distinta a diferentes zonas del espectro UV. Usualmente, dicha respuesta se determina experimentalmente y se representa como un espectro de acción. Un *espectro de acción* describe la eficiencia relativa de la radiación UV, en función de la longitud de

onda (λ), a la producción de una particular respuesta biológica. Esta respuesta biológica podrá referir variados efectos perjudiciales en los seres vivos, incluyendo plantas, animales y seres humanos. El *espectro de acción* para un determinado efecto biológico es usado como un factor ponderado sobre la longitud de onda para la irradiancia espectral UV (280 – 400 nm) y, posteriormente, integrado en longitud de onda para obtenerse la irradiancia con efecto biológico (en W/m^2). La dosis UV efectiva (en J/m^2) para un determinado período de exposición es calculada sumando (integrando) la irradiancia efectiva en el período de exposición. El espectro de acción más importante para el uso cotidiano es el eritémico, que describe la posible formación de cáncer de piel sin melanoma. Diversos organismos internacionales han recomendado que se utilice el Espectro de Acción Eritémico de McKinlay y Diffey (CIE eritémico). Fundamentado en este hecho, ciertos radiómetros UVB de banda ancha tienen como característica principal la de poseer una respuesta espectral similar al espectro de acción antes mencionado.

Tomando en consideración lo señalado en el párrafo precedente, se define la Irradiancia UVB efectiva o biológicamente ponderada como la integral de la multiplicación cruzada de la irradiancia espectral en $W\ m^{-2}\ nm^{-1}$ y el espectro de acción de eritémico.

10.1.2 Dosis.

Como ya se ha indicado se denomina dosis a la cantidad de energía por unidad de superficie que una persona recibe, en este caso, por exponerse al sol. En realidad es tan importante saber que recibir entre 250 y 400 W/m^2 son suficientes para cau-

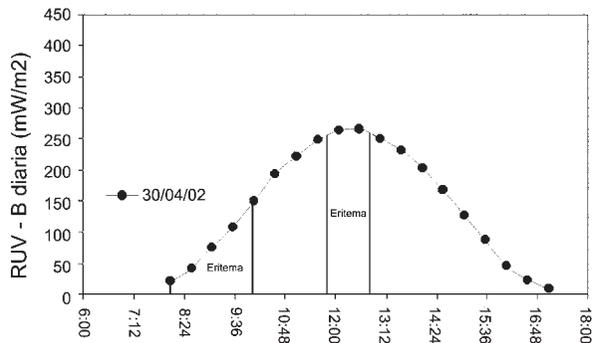


Figura 10.1. Para acumular la misma dosis de radiación ultravioleta se requiere mayor tiempo al principio o al final del día que alrededor del medio día local.

sar un eritema (para un tipo de piel medio), que saber en cuánto tiempo la piel recibe esta cantidad. Esta cantidad dependerá de la hora del día. Como se ve en las figuras 10.1 y 10.2.

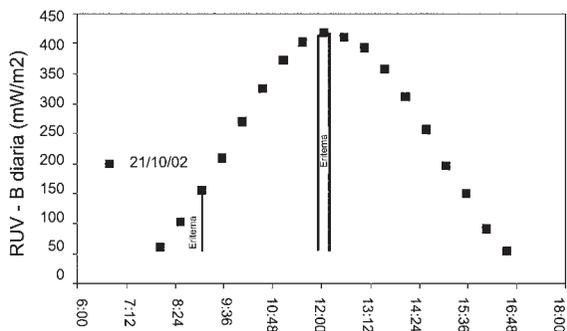


Figura 10.2. En verano el tiempo de precaución se extiende (de las 10:00 a las 15:00) debido a que el sol se encuentra a una altura mayor y por tanto la dosis es mayor. La piel sufre quemaduras en menor tiempo. Ver también la figura 4.2.

10.1.3. Dosis Mínima Eritémica (MED).

Al constituir las quemaduras un efecto negativo frecuente en la piel humana, el espectro de acción CIE eritémico es el que más se recomienda utilizar a la hora de cuantificar el efecto dañino de la radiación UV sobre la piel. La "dosis mínima eritémica" MED se usa para describir el potencial eritémico de la radiación UV, y 1 MED se define como la dosis efectiva de radiación UV que produce un enrojecimiento observable de la piel humana sin exposición previa, en otras palabras, es la cantidad necesaria para "sentir" la acción del sol sobre la piel. Sin embargo, los diferentes individuos no presentan la misma sensibilidad a la radiación UV debido a la protección propia de la piel (pigmentación), 1 MED varía en la población europea entre 200 y 500 J/m². Si no existen estudios disponibles sobre la sensibilidad de la población en una región dada se pueden consultar los valores de MED para diferentes tipos de piel mostrados en la tabla 10.1.

Tabla 10-1		
Tipos de piel y la cantidad de radiaciones Ultravioleta A y B necesarias para producir un eritema		
Tipo de piel	UVB	UVA
	Dosis mínima mJ/cm²	Dosis Mínima mJ/cm²
I	15-30	20-35
II	25-40	30-45
III	30-50	40-55
IV	45-60	50-80
V	65-90	70-100
VI	90-150	< 100

Para conocer nuestro tipo de piel la OMS ha construido una tabla de referencia para los seis tipos de piel reconocidos.

Tabla 10-2		
Clasificación de los tipos de piel		
Tipo de piel	¿Se quema al Sol?	¿Se broncea después de exponerse al Sol?
I	Siempre	Rara vez
II	Usualmente	Algunas veces
III	Algunas veces	Usualmente
IV	Rara vez	Siempre
V	Piel color marrón natural	
VI	Piel color negro natural	

10.2. La campaña de radiación ultravioleta en Bolivia.

La campaña del IUV en La Paz (y posteriormente Bolivia) fue promovida por el interés de cuantificar la cantidad de radiación ultravioleta que llegaba a nuestro territorio de parte del naciente Laboratorio de Ozono y Radiación Ultravioleta (LO-RUV), que ahora funciona como el Laboratorio de Física de la Atmósfera (LFA).

Nació con el fin de informar y educar acerca de los riesgos de exponerse excesivamente a la radiación ultravioleta. Para este fin se ha desarrollado una estrategia

de alcance a todos los sectores más vulnerables de la población boliviana. Una de estas estrategias consiste en educar a educar; es decir diseminar la información a través de personas claves para esta difusión, logrando de esta manera, efectos multiplicadores.

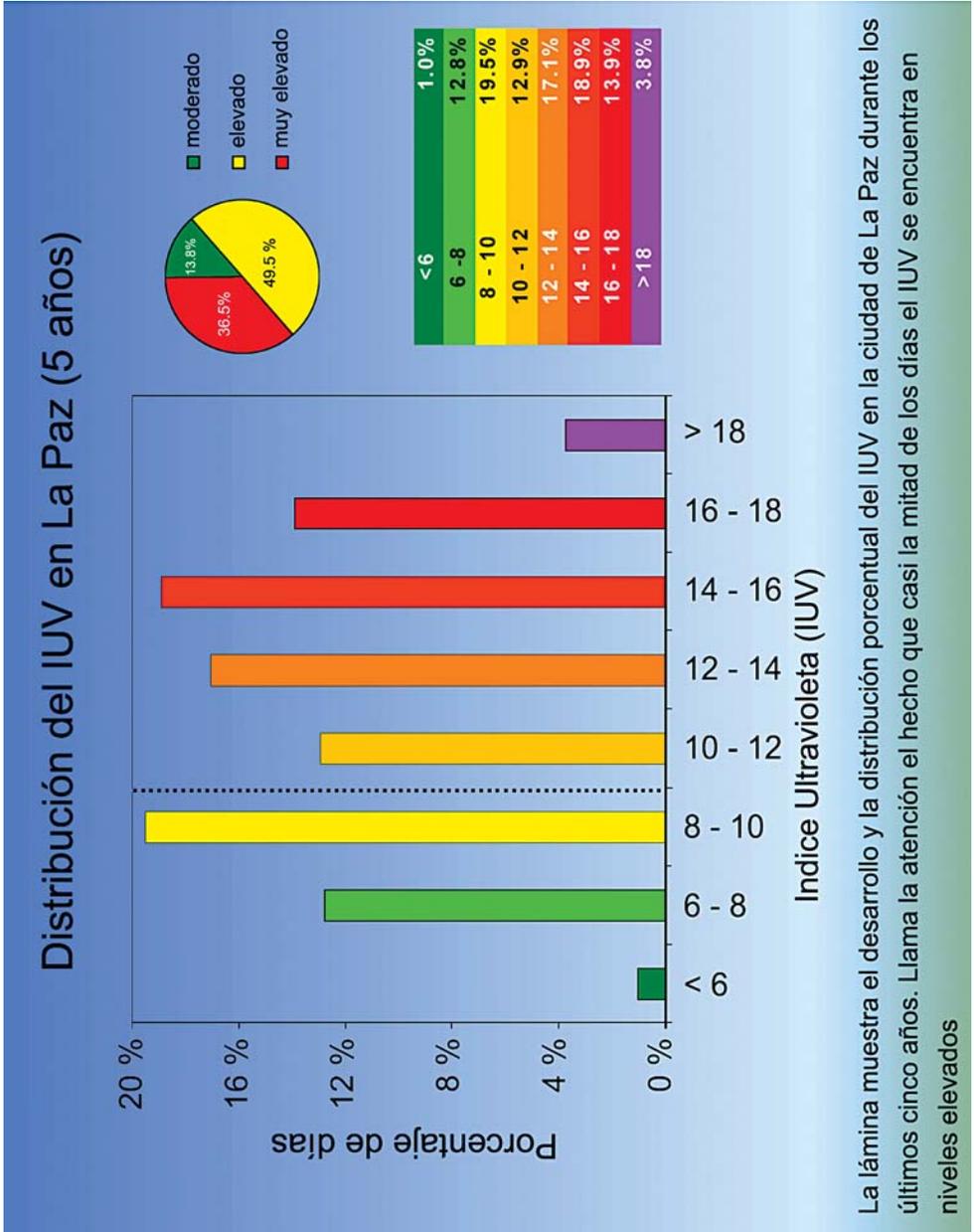
Consideramos a la campaña como un conjunto de acciones para informar, educar y prevenir sobre los riesgos que conlleva una excesiva exposición a la radiación UV-B. Los acontecimientos mundiales como el descubrimiento de un “agujero” en la capa de ozono sobre el continente antártico y el despertar de una conciencia mundial sobre el problema de la sostenibilidad del desarrollo jugaron un papel importante a la hora de conseguir el apoyo de instituciones para la consecución de equipos especializados. Una vez realizadas mediciones en La Paz, los datos tomados tuvieron que esperar un tiempo prudencial para ser difundidos al público, debido a que no se tenía ningún referente de este tipo de mediciones y además que éstos eran demasiado altos con respecto a la escala difundida por campañas de prevención establecidas en países como Canadá o Australia.

Al mismo tiempo, debemos indicar que después de 6 años de mediciones hemos evidenciado que la atmósfera boliviana no ha sufrido cambios; aunque la cantidad de radiación ultravioleta que llega en especial al Altiplano es muy alta. Por otro lado, algunos estudios muestran que la incidencia de cáncer de piel en localidades de altura va en ascenso. Entonces, si la atmósfera boliviana no ha cambiado, ¿qué o quiénes son los responsables de este incremento? La razón la podemos encontrar en el cambio en los hábitos de vestimenta.

La difusión comenzó en 1997: consistía en un reportaje en vivo de parte de Radio Fides. El siguiente año se amplió a cinco emisoras y, a partir de 1999, se contó con una gran participación de medios tanto orales como escritos y audiovisuales. La información que se entrega tiene carácter de salud pública por lo que se difunde gratuitamente. Actualmente se cuenta con un equipo de aproximadamente 7 profesionales que brindan conferencias tocando cuatro temas: Radiación ultravioleta, Daños en la piel, Daños en los ojos y Medidas de precaución (Lámina XIV).

Particularmente alarmante fue la campaña del verano 2001 – 2002 que coincidió con la calibración del espectrofotómetro BREWER, el principal instrumento del LFA: se registraron valores nunca observados, los valores de ozono fueron particularmente bajos y los de ultravioleta en contraposición muy elevados.

Lámina XIV



La lámina muestra el desarrollo y la distribución porcentual del IUV en la ciudad de La Paz durante los últimos cinco años. Llama la atención el hecho que casi la mitad de los días el IUV se encuentra en niveles elevados

Lámina XV



Dos imágenes de la Campaña de la radiación ultravioleta: una exposición en el Prado (arriba) y un Taller en Potosí (abajo)



10.3. Los sectores más vulnerables.

La población boliviana que vive en el altiplano a más de 3000 metros sobre el nivel del mar, representa más del 40% de los 8 millones de habitantes; en el área metropolitana altiplánica viven casi dos millones de personas y en el área rural altiplánica aproximadamente un millón y medio. Dentro de este 40% muchas de las personas desarrollan sus actividades expuestas directa o indirectamente al sol. Entre ellos encontramos a los comerciantes informales, la policía (agentes de parada), los militares, los obreros en construcciones, niños en edad escolar y profesores de educación física.

Los comerciantes informales y policías trabajan expuestos no sólo a la radiación solar sino también a la contaminación urbana producida por el tráfico vehicular, debido a que la topografía de la ciudad de La Paz no favorece al desahogo del tráfico sino más bien a su concentración.

Los profesores de educación física pasan todas sus horas escolares expuestos al sol; es evidente que los niños también se encuentran expuestos aunque la dosis que reciben es menor.

Para desarrollar una estrategia de alcance a estos sectores se han tomado las siguientes líneas:

- Para alcanzar a los agentes de parada, policías y militares (navales, ejército y fuerza aérea) se realizaron seminarios con la presencia de sus máximas autoridades y personal de todas las gradaciones quienes estuvieron encargados de difundir la información recibida. Debido a los cambios de destino es necesario repetir estos talleres como mínimo cada dos años.
- En el caso de los profesores de educación física se han brindado seminarios específicos para directores y profesores de la materia con el fin de informar tanto a interesados como a afectados acerca de los riesgos y las medidas de prevención que deben tomarse. (Lámina XV).
- En el caso de los niños la estrategia fue doble: por un lado informar a las maestras de educación inicial y por otro lado a los mismos niños quienes se encargarán de llevar la información a sus casas y amigos. Los niños se han convertido en uno de los mejores vehículos para la difusión de las medidas de precaución.

- El sector de la dirigencia de los informales en cambio, no supo aquilatar la urgencia e importancia de la información brindada y no pudo realizarse seminario alguno.
- Por otro lado, en el sector campesino, los afiches o los esfuerzos por realizar seminarios son insuficientes debido a la gran dispersión de la población rural. Por este motivo además de seminarios que se dieron en la provincia Omasuyos, se procuró emitir información por medio de Radio San Gabriel debido a su gran alcance dentro el área rural.

10.4. Hacia un cambio de hábitos.

El punto clave de la campaña se encuentra en concientizar gradualmente a la gente con información veraz, accesible, de “primera mano” y con recomendaciones útiles. El rol de los medios de comunicación social es clave en esta concientización, porque brindan información periódica y contamos a diario con la ayuda eficaz para fijar los conceptos, reorientar y reencauzar los flujos informativos.

Además la campaña brinda información directa a los sectores que hemos considerado prioritarios. Debido a los cambios en los hábitos de vestimenta que son notorios en toda la población boliviana (tanto rural como urbana), decidimos priorizar uno de los aspectos más abandonados como es el uso del sombrero de ala ancha (Lámina XVI).

Tenemos la esperanza que los seminarios y talleres dictados a los uniformados del país repercutan no solamente en la supresión de algunos castigos inhumanos, sino también en la adecuación del uniforme a las condiciones geográficas de nuestro territorio.

En los diferentes seminarios, talleres y conferencias que se brindan se recalcan las medidas de protección (Lámina XVI). En tiempo de alerta el horario de máxima protección se amplía: de 10:00 a 15:00.

10.5. Productos y logros de la campaña.

Uno de los primeros desafíos de la campaña fue el de difundir el índice de radiación ultravioleta (IUV) de una manera clara de tal modo que cumpla con su objetivo: alertar a la población sobre los riesgos que corre al exponerse excesivamente al sol.

Lámina XVI

Medidas de protección



Evite desarrollar actividades entre las 11:00 y las 14:00



Utilice sombrero de ala ancha



Utilice lentes adecuados



Utilice ropa de manga larga



Busque y prefiera la sombra



Utilice **bloqueador** de SPF* mayor a 15

*SPF Factor de Protección Solar por sus siglas en inglés

Las campañas de otros países habían tomado el modelo de una tabla con valores del 1 al 16 en los que se daban categorías: bajo (1-3), moderado (4-6), alto (7-9) y extremo (>10). Sin embargo, esta manera de difundirlo no informa acerca de las medidas que se deben tomar para protegerse y consideramos que "enmascara" un peligro latente. Por este motivo decidimos buscar un mejor método, una mejor manera de difundir con claridad, sin alarmar y con el fin específico de orientar a la población acerca de los riesgos de exponerse directamente al sol en horarios alrededor del mediodía local.

La siguiente tabla corresponde a un valor de índice ultravioleta 14.

Tabla 10-3				
La Paz y Altiplano		Tiempo máximo de exposición en minutos		
Tipo de piel	Ejemplo	Nublado	Seminublado	Despejado
Muy oscura	Altiplánica	30	20	16
Media	Mediterránea	17	11	9
Muy clara	Nórdica	8	5	4

En esta tabla se puede apreciar el tiempo que puede permanecer expuesto al sol un determinado tipo de piel, de acuerdo al tipo de clima en el que se encuentre. Consideramos que esta manera de brindar la información cumple de mejor manera el propósito para el cual fue creado el IUV.

Después de cuatro años de campaña se han elaborado varios materiales tanto impresos como digitales. Se tiene elaborado:

- Un folleto de información general sobre la radiación ultravioleta y la campaña de verano.
- Un folleto de información para niños denominado "Fotoprotección en edad escolar".
- Un folleto bilingüe de información para turistas.
- Un afiche sobre la prevención dirigido hacia la población urbana.
- Un afiche sobre la prevención dirigido hacia la población rural.
- Una cuña radial en aymara.

- Un spot publicitario que fue difundido en 4 redes televisivas de alcance nacional.

Uno de los mayores logros es que luego de cuatro años de trabajo, el Laboratorio de Física de la Atmósfera se ha convertido en el referente en cuanto a asuntos referidos al ozono y a la radiación ultravioleta. Además se ha logrado que un equipo interinstitucional (Ministerio de Salud, OPS-OMS, UMSA, Sociedad Boliviana de Dermatología) trabaje coordinadamente en pos de la salud preventiva en esta área específica de investigación.

Un logro colateral es la anexión de la Federación de productores de sombreros (FE-DESO) que ya ha realizado con éxito dos ferias del sombrero continuando la línea de recuperación del uso del sombrero de ala ancha.

En la campaña correspondiente al verano 2001 – 2002 se llevó a cabo una encuesta de opinión y conocimiento acerca de los objetivos y precauciones que difunde la presente campaña con resultados alentadores.

Actualmente el equipo de la campaña trabaja en el desarrollo de material para conferencias, didáctico y portátil; consiste en 8 afiches informativos sobre los temas tocados a lo largo del presente libro.

10.6. Lo que queda por hacer.

La generación de conciencia en la población toma tiempo, por lo que la sostenibilidad de la campaña debe garantizarse por lo menos durante las siguientes dos décadas. Se requiere, además, del diseño de una política gubernamental de largo aliento para financiar y apoyar las futuras campañas.

Una de las mejores alternativas para brindar sostenibilidad a la campaña de concientización consiste en la elaboración de material educativo para el sector primario que podría tratarse de una transversal de educación sobre el Sol, aspectos generales, culturales, religiosos y medidas de precaución.

Por otro lado, en vista de que el único departamento de Bolivia que cuenta con piranómetros (instrumentos para medir radiación ultravioleta) es La Paz, consideramos que en una primera etapa deberían instalarse piranómetros en las capitales de departamento, principalmente en el área del Altiplano.

Se necesita ampliar la cobertura de difusión de la campaña, en especial en el ámbito rural del interior del país.

Los medios de comunicación social juegan un rol importante que debe ser afianzado para la disseminación de información a sectores de la población mediante la suscripción de convenios con este fin como una política de salud pública.

Un servicio descuidado ha sido el referido al tema “calidad de los lentes” cuyo objetivo es certificar la protección de los lentes que actualmente se expenden.

Una gran falencia con la que se tropieza es la falta de un banco de datos de enfermedades del ambiente que ayudaría al mejor diseño de las políticas de salud ambiental que procura el estado y los donantes internacionales.

EL PROTOCOLO DE MONTREAL RELATIVO A LAS SUSTANCIAS AGOTADORAS DEL OZONO (SAO) EN BOLIVIA

Javier Alex Suárez Irusta

Coordinador - Comisión Gubernamental del Ozono
Ministerio de Desarrollo Sostenible y Planificación
ozonobolivia@mdsp.gov.bo

11.1. Los protocolos internacionales.

Como consecuencia de los resultados obtenidos tras diferentes investigaciones internacionales sobre el comportamiento de la capa estratosférica de ozono, en marzo de 1985 y con la asistencia de 41 naciones del mundo se genera el marco general para atender el problema ambiental del deterioro del ozono estratosférico, con la firma del Convenio de Viena para la Protección de la Capa de Ozono.

Este acuerdo reconoció los posibles efectos adversos que podían generarse en el medio ambiente global, y se decidió promover la investigación, el intercambio de información y las observaciones científicas para obtener elementos y datos que permitan conocer mejor el fenómeno del deterioro de la capa de ozono. Este acuerdo no estableció restricciones al uso de sustancias agotadoras del ozono, pero sí consideró el desarrollo de controles específicos en el futuro.

Debido a los informes de la comunidad científica mundial, que certificaban que el fenómeno ambiental tenía un progreso alarmante, en septiembre de 1987 se firma en Canadá, el Protocolo de Montreal relativo a las sustancias agotadoras del ozono (SAO). Este protocolo identifica a las principales sustancias agotadoras del ozono y establece mecanismos y calendarios de control para la reducción y posterior eliminación del consumo (producción, importación y exportación) mundial de sustancias que afectan de manera negativa a la capa estratosférica de ozono, y se constituye en un instrumento jurídico entre los Países Partes, que compromete su cumplimiento a los objetivos por él establecidos.

Un aspecto importante de este protocolo es la diferenciación de responsabilidades entre países desarrollados y países en desarrollo, reconociendo la mayor dificultad para estos últimos en la implementación de las medidas de control, por lo que estableció plazos diferenciados y mayores que los aprobados para los países desarrollados. El Protocolo de Montreal entró en vigor el 1° de enero de 1989 y restringió el comercio de SAO con los países que no eran Parte del acuerdo.

El Protocolo de Montreal es un acuerdo internacional que se caracteriza por ser muy dinámico, y ha tenido diferentes enmiendas; la primera se realizó en Londres en 1990, se añadieron nuevas sustancias a la lista de sustancias agotadoras de ozono y se establecieron los mecanismos de asistencia técnica y financiera para los países en desarrollo. En 1992 se realiza la enmienda de Copenhague, que creó oficialmente el Fondo Multilateral como canal de asistencia para los países en desarrollo y se incluyeron otras nuevas sustancias. Posteriormente se realizó la enmienda de Montreal en 1997, donde se establecieron controles al comercio con Estados Partes mediante el establecimiento de Sistemas de Licencias de importación y exportación para Sustancias Agotadoras del Ozono, para evitar el comercio ilícito internacional de estas sustancias. Finalmente, se realizó la enmienda de Beijing en 1999, que principalmente revisa los calendarios de eliminación con la inclusión de nuevas sustancias.

El Protocolo de Montreal considera la diferenciación de países que necesitan asistencia técnica y financiera, mediante su artículo 5, párrafo primero, estableciendo que las Partes que tengan un nivel calculado de consumo anual de las sustancias controladas del anexo A sea inferior a 0,3 Kg. per cápita en la fecha en la que el Protocolo entra en vigencia para dicha parte.

El Fondo Multilateral es el principal mecanismo de asistencia técnica y financiera para los países en desarrollo y es administrado por un Comité Ejecutivo compuesto de 14 miembros distribuidos equitativamente (7 de países desarrollados y 7 de países en desarrollo). Las actividades y proyectos aprobados por el Comité Ejecutivo son ejecutados por cuatro agencias internacionales de implementación – el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente PNUMA, el Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo PNUD, la Organización de las Naciones Unidas para el Desarrollo Industrial ONUDI y el Banco Mundial BM – contando además con otras agencias de cooperación bilateral.

11.2. La Ley del Medio Ambiente 1333 y su reglamentación.

En abril de 1992, entra en vigencia la Ley No. 1333 del Medio Ambiente, que establece el marco de principios éticos y políticos para la protección y conservación del Medio Ambiente y los Recursos Naturales.

Dicha Ley en su Título III de los aspectos Ambientales, Capítulo I de la Calidad Ambiental en su artículo 17 establece, que es deber del Estado y la Sociedad “garantizar el derecho que tiene toda persona y ser viviente a disfrutar de un ambiente sano y agradable en el desarrollo y ejercicio de sus actividades”. En su capítulo V, de los Asuntos del Medio Ambiente en el contexto Internacional; en su artículo 30 establece que el Estado es el que “regula y controla la producción, introducción, la comercialización de productos farmacéuticos, agrotóxicos y otras sustancias peligrosas y/o nocivas para la salud y/o del medio ambiente. Se reconocen como tales, aquellos productos y sustancias establecidas por los organismos nacionales e internacionales correspondientes, como también las prohibidas en los países de fabricación o de origen”.

En su Título VIII, de la Ciencia y Tecnología Capítulo I Artículo 85, establece que corresponde al Estado, y a las instituciones técnicas especializadas, “promover y fomentar la investigación y el desarrollo científico y tecnológico en materia ambiental” además “controlar la introducción o generación de tecnologías que atenten contra el medio ambiente”.

11.3. Bolivia y los tratados internacionales sobre la capa de ozono.

Mediante Ley de la República N° 1584 del 3 de Agosto de 1994, el Gobierno de Bolivia se adhiere a los tratados internacionales para la preservación de la Capa de Ozono, entre ellos el Convenio de Viena, el Protocolo de Montreal y sus enmiendas de Londres y Copenhague. Posteriormente, mediante Ley de la República N° 1933 del 21 de Septiembre de 1998 se adhiere a la Enmienda de Montreal al Protocolo de Montreal.

Con el apoyo del Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente PNUMA, se realiza una evaluación de la situación de consumo de Sustancias Agotadoras del Ozono en Bolivia, lográndose el levantamiento de datos estimativos que dan lugar a un Programa de País, que marca los lineamientos básicos que nuestro país debe seguir para lograr la eliminación de sustancias contaminantes contra el ozono, dentro de los plazos establecidos por la comunidad internacional.

Gracias a este diagnóstico inicial, mediante la entonces Secretaría Nacional de Recursos Naturales y Medio Ambiente como Autoridad Ambiental Nacional, siguiendo los lineamientos del Protocolo de Montreal, se establece la Unidad Nacional de Ozono de Bolivia, con el denominativo de “Comisión Gubernamental del Ozono” para desarrollar y promover las acciones necesarias como Estado Parte de los convenios Internacionales, a fin de cumplir con los compromisos asumidos para la protección de la capa estratosférica de ozono.

Con la información contenida en el programa de país, una vez que se identificaron los principales sectores que debían tener atención en el ámbito nacional con referencia al consumo de sustancias agotadoras de ozono, se emite una disposición oficial que plantea un calendario de eliminación en el uso de las principales sustancias agotadoras de ozono, hasta el año 2000. Esta disposición no cuenta con un respaldo técnico adecuado, debido principalmente a la inexistencia de registros e información pasada sobre las tendencias en las cantidades utilizadas en el territorio nacional, los principales consumidores, empresas o industrias dependientes y especialmente los principales importadores. En consecuencia, esta Resolución no alcanzó sus objetivos, al no eliminarse el consumo en importantes sectores usuarios hasta el año 2000 como lo establecía.

Posteriormente, se emite una disposición que desde enero de 1998, prohíbe la importación y desaduanización de equipos de refrigeración doméstica, comercial e industrial y de climatización y/o aire acondicionado, que contenga como sustancia refrigerante, carga de diclorodifluorometano (CFC-12). La labores operativas para el cumplimiento de esta disposición son delegadas al Instituto Boliviano de Normalización y Calidad IBNORCA. Debido a la falta de un acuerdo previo con los sectores comercializadores e importadores de la mercadería afectada por esta Resolución Ministerial, se tuvo que postergar la aplicación de esta medida hasta febrero de 2000, fecha en la que gracias al trabajo y concertación entre el Ministerio de Desarrollo Sostenible y Planificación, la Aduana Nacional de Bolivia, el IBNORCA y los sectores importadores, se inicia la aplicación de estas restricciones a nivel nacional, de manera efectiva incluso en las labores de control operativo en recintos aduaneros y la emisión de certificados de Conformidad o No conformidad por parte del IBNORCA como requisito INDISPENSABLE para la atención por parte de la Aduana Nacional.

Otra disposición que emite el Ministerio de Desarrollo Sostenible y Planificación, es la creación del Padrón Nacional de Fabricantes y Técnicos de Equipos de Refrigeración y Climatización, para proceder al registro gratuito y obligatorio de todas las personas jurídicas y naturales dedicadas a tal actividad. Esta Resolución Minis-

terial se viene implementando efectivamente con las 9 Prefecturas Departamentales y será en el mediano plazo sistematizada mediante una red informática nacional que incorporará una base de datos del sector de servicios en refrigeración a nivel nacional.

También se han emitido disposiciones dirigidas a proporcionar apoyo a las industrias nacionales, mediante procesos de evaluación y selección que permitirán que la industria nacional tenga un apoyo efectivo de la cooperación internacional, especialmente en el asesoramiento para la transición gradual a tecnologías libres de sustancias agotadoras de ozono. Mediante este mecanismo ya se han identificado dos empresas nacionales que tendrán apoyo técnico y financiero para adoptar tecnologías que no afecten negativamente a la capa de ozono y les permita continuar con sus procesos productivos utilizando nuevos métodos y prácticas inocuas para el medio ambiente.

El plan de adecuación para empresas e industrias nacionales tiene un cronograma definido en función a la asignación de recursos por parte las instancias ejecutivas del Protocolo de Montreal, para los diferentes sectores de consumo en Bolivia, por lo que es un proceso gradual y dinámico que pretende principalmente proporcionar apoyo técnico y asesoramiento en nuevas tecnologías libres de contaminantes atmosféricos, evitando cambios traumáticos en cortos plazos.

Desde el año 1999, se han generado espacios de consulta con diferentes sectores a nivel nacional, a fin de coordinar las políticas que permitan implementar el Protocolo de Montreal relativo a las sustancias agotadoras del ozono, en Bolivia. En este sentido, se ha mantenido una relación de permanente coordinación con la Aduana Nacional de Bolivia, el Instituto Boliviano de Normalización y Calidad, la Cámara Nacional de Comercio, la Cámara Nacional de Industrias y otros ministerios como el Ministerio de Agricultura, Ganadería y Desarrollo Rural, el Ministerio de Salud y Previsión Social, el Ministerio de Gobierno, el Ministerio de Hacienda, el Ministerio de Educación, Cultura y Deportes, y el Ministerio de Relaciones Exteriores y Culto.

Una instancia de cooperación muy importante ha sido la Universidad Mayor de San Andrés, a través del Laboratorio de Física de la Atmósfera, que de manera permanente ha sido la contraparte científica para la Comisión Gubernamental del Ozono que se dedica a los aspectos institucionales de implementación del Protocolo de Montreal en Bolivia.

Con ese marco Interinstitucional, desde la gestión 2000, se viene trabajando en la preparación y aprobación de nuevos proyectos dirigidos a la sustitución, reducción y posterior eliminación de sustancias agotadoras del ozono en Bolivia. Se han identificado muchas necesidades que fueron objeto de consulta y coordinación entre las diferentes instituciones y los sectores público y privado del país, para el desarrollo de nuevas políticas nacionales previamente expuestas, consultadas y concertadas con los involucrados, para que estas disposiciones sean factibles de aplicación inmediata.

Actualmente se está elaborando un proyecto de Decreto Supremo con el Sistema de Licencias de Importación y Control para Sustancias Agotadoras del Ozono SILLICSAO, el mismo que ha sido amplia y participativamente consultado en su proceso de preparación. Este sistema contará con un Reglamento que dictará los procedimientos y operaciones para que el control y registro de las sustancias listadas en el Protocolo de Montreal sea muy efectivo en el territorio nacional.

Estas acciones se acompañan de otras actividades complementarias dirigidas a fortalecer estos instrumentos de gestión ambiental, como ser:

- a) La instalación de una Red Nacional de información sobre sustancias agotadoras de ozono, mediante la cual se mantendrá una conexión permanente con las 9 prefecturas departamentales, la Aduana Nacional y el Instituto Boliviano de Normalización y Calidad, para el intercambio y alimentación continua de información para dos bases de datos sobre registro, consumo y aplicaciones de sustancias agotadoras de ozono. Del mismo modo, las bases de datos se alimentarán con los datos de importación no sólo de sustancias puras, sino de equipos, accesorios y productos terminados que sean susceptibles de contener estas sustancias o destinados a este tipo de tecnología, para restringir su ingreso a territorio nacional según lo planificado y previsto por la normativa nacional que se está generando.
- b) Consolidación del Programa Nacional de Recuperación y Reciclaje de Refrigerantes, que persigue la recuperación y reutilización de las mayores cantidades de gases clorofluorocarbonos CFC que están contenidos en equipos principalmente domésticos, para procesarlos, limpiarlos e inyectarlos nuevamente en equipos que requieran mantenimiento y servicio, abasteciendo de esta manera la demanda interna nacional y reduciendo la necesidad de nuevas importaciones.
- c) Reconversión de industrias nacionales para adoptar tecnologías limpias e inocuas para la capa de ozono, tanto en el sector de polímeros usuarios de agentes espumantes CFC, como el sector agrícola usuario de bromuro de metilo.

- d) Programas de capacitación para el sector de servicios en refrigeración, a nivel nacional, para que puedan adoptar las nuevas tecnologías – químicas y naturales – para su aplicación en los equipos de la ciudadanía boliviana, promoviendo el uso de sustancias naturales que no afectan el equilibrio ambiental de manera drástica.
- e) Programas de educación sobre el fenómeno ambiental del deterioro de la capa de ozono. Estos programas están dirigidos principalmente al sector industrial y al sector de educación formal en el marco de la reforma educativa, coordinado con el Ministerio de Educación, Cultura y Deportes. Al mismo tiempo, se están organizando campañas de difusión y concientización para toda la población, a través de entrevistas, exposiciones, ferias ambientales, etc.
- f) Programas de capacitación para funcionarios de Aduanas, IBNORCA y funcionarios del gobierno relacionados con el control de importaciones (prefecturas y principales municipios), para que cuenten con la capacitación y los equipos para una detección adecuada y oportuna de sustancias agotadoras del ozono.
- g) Fortalecimiento a centros de formación técnica calificada mediante la instalación de laboratorios de refrigeración equipados con la última tecnología, para eliminar el empirismo en los técnicos de refrigeración, incrementando la oferta de personal calificado en beneficio de la sociedad boliviana.
- h) Certificación y acreditación para los técnicos en refrigeración que han sido capacitados en los centros de entrenamiento técnico calificado, para que se pueda identificar al personal más capacitado del país, y de esta manera la industria nacional tenga referencias de las mejores y mayores capacidades disponibles en el país, sin tener que recurrir eventualmente a servicios del exterior de nuestras fronteras, apoyando la iniciativa y esfuerzo nacionales.

Para desarrollar y ejecutar todas estas tareas se está planificando la formación de una instancia nacional que supervisará y coordinará el permanente proceso gradual de reducción y eliminación del consumo nacional de sustancias agotadoras del ozono, el mismo que se traducirá en una Estrategia Nacional de Eliminación de Sustancias Agotadoras del Ozono ENESAO y que con seguridad permitirá alcanzar las metas propuestas gracias a al permanente consulta y participativo proceso de formulación y revisión de normas y procedimientos que ha caracterizado a los sectores comprometidos y responsables para la eliminación de estos contaminantes atmosféricos en el país.

11.4. Conclusiones.

En resumen, nuestro país se encuentra desarrollando los instrumentos y mecanismos más adecuados para lograr la eliminación de las sustancias que afectan negativamente a la capa de ozono estratosférica que protege a nuestro planeta de efectos nefastos que podrían intensificarse si no se realizan acciones efectivas a nivel mundial. El proceso está avanzando con el apoyo de la comunidad internacional y Bolivia cada vez asume posiciones de mayor expectativa al interior del Protocolo de Montreal, por un dinámico proceso de concertación, preparación y ejecución de proyectos, como miembro del Comité de Aplicación del Protocolo de Montreal en dos oportunidades – representando a Latinoamérica y el Caribe – y en su actual calidad de miembro Titular del Comité Ejecutivo de Fondo Multilateral para la Implementación del Protocolo de Montreal, representando también a Latinoamérica y el Caribe.

El Gobierno Boliviano está desarrollando todas las acciones posibles para lograr un proceso gradual y continuo en la eliminación de contaminantes atmosféricos que dañan la capa de ozono, y al mismo tiempo está generando los mecanismos de apoyo y asesoramiento a la industria nacional, y los diferentes sectores involucrados para que puedan ofrecer a la sociedad boliviana tecnología de última generación con personal altamente calificado, sin impactos traumáticos para la economía del ciudadano de nuestro país.

APÉNDICES

Flavio Ghezzi

Laboratorio de Física de la Atmósfera, IIF-UMSA

fghezzi@o3-bolivia.org

A-1. Preguntas más frecuentes.

Las respuestas a estas preguntas resumen argumentos más ampliamente tratados en el texto.

A-1.1. Radiación ultravioleta – preguntas generales.

A.- ¿Por qué hay que protegerse del sol?

En los últimos años se ha detectado un aumento alarmante en el número de casos de cáncer de piel entre las personas. Se sabe que las radiaciones solares, además de ser causantes de quemaduras, envejecimiento cutáneo precoz y desarrollo de cataratas oculares, producen efectos cancerígenos sobre la piel. Está comprobado que los rayos ultravioleta (UV) son los principales responsables de esta situación.

Especialmente los bebés y los niños más pequeños (menores de 3 años) son los más sensibles a los efectos nocivos de estas radiaciones.

B.- ¿Cuáles son los mejores métodos de fotoprotección?

Las medidas de fotoprotección más importantes son:

- Evitar la exposición prolongada al sol, sobre todo en las horas centrales del día.
- Buscar sombras en los espacios abiertos o proveerse de sombrillas.
- Emplear gorros o mejor sombreros con ala.

- Utilizar ropas que cubran buena parte del cuerpo, como camisetas con mangas y pantalones tipo bermudas, cuando se permanezca en áreas soleadas.
- Llevar gafas de sol oscuras, con filtro para rayos UV. Esto protege la delicada piel que rodea los ojos y previene además el desarrollo precoz de cataratas.
- En cualquier caso, conviene que la exposición solar en la temporada veraniega se realice de forma gradual, aumentando gradualmente y poco a poco el tiempo que se está al sol.
- Usar cremas o lociones con filtro solar que sean resistentes al agua (sino fuera así, aplicar repetidamente), con un factor de protección 15 ó superior.

A-1.2. Radiación ultravioleta – mitos y realidades.

A cada afirmación conteste con Verdadero o Falso. Las respuestas se encuentran en el Apéndice A-3

- a.- *No te puedes quemar en un día cubierto.*
- b.- *Demasiado sol es peligroso, independientemente de la edad.*
- c.- *Las cremas solares me protegen, así que puedo tomar el sol mucho más tiempo.*
- d.- *Deberías evitar el sol en verano entre las 11 y las 15 horas.*
- e.- *Si no siento calor cuando estoy al sol, no me quemaré.*
- f.- *La radiación UV no afecta solamente a la piel, sino también a los ojos.*
- g.- *Simplemente vuelve a aplicarte crema solar para estar más tiempo al sol.*
- h.- *La gente con piel clara y pelirroja es especialmente sensible a la radiación UV.*
- i.- *El bronceado te protege de quemaduras por el sol.*
- j.- *Los efectos negativos de las quemaduras por el sol son acumulativos.*
- k.- *El sol en invierno y primavera no es peligroso.*
- l.- *Se debe proteger especialmente a los niños.*
- m.- *Se debe tener en cuenta la reflexión de la radiación UV por parte del agua, la arena y la nieve.*
- n.- *Es necesario estar al sol debido a que la vitamina D se sintetiza con ayuda de la radiación UV.*

- o.- Cuanto más cortas son las sombras, más peligroso es el sol.*
- p.- No te puedes quemar mientras estás en el agua.*
- q.- A mayor altitud, es más fácil quemarse.*
- r.- La protección contra el sol más económica y efectiva es la sombra.*

A-1.3. Ozono.

- a.- ¿Cómo pueden llegar a la estratosfera los clorofluorocarbonados (CFC) si son más pesados que el aire?*

Los CFC llegan a la estratosfera porque la atmósfera de la tierra está siempre en movimiento y mezcla las sustancias químicas que se le añaden.

En realidad las moléculas de CFC son varias veces más pesadas que el aire. No obstante, miles de mediciones de globos, aeronaves y satélites demuestran que los CFC están realmente presentes en la estratosfera. Esto se debe a que los vientos y otros movimientos del aire mezclan la atmósfera hasta altitudes por encima de la parte superior de la estratosfera con mucha más velocidad que aquella a la que las moléculas pudieran depositarse por su peso. Los gases tales como los CFC que no se disuelven en agua y que relativamente no reaccionan en la atmósfera inferior se mezclan con relativa rapidez y por consiguiente llegan a la estratosfera sea cual fuere su peso.

- b.- ¿Cuáles son las pruebas de que el cloro y el bromo destruyen el ozono estratosférico?*

Numerosas investigaciones y análisis de laboratorio acerca de mediciones efectuadas en todo el mundo de la estratosfera han demostrado que las sustancias químicas que contienen cloro y bromo destruyen las moléculas de ozono. Los estudios de investigación del laboratorio muestran que el cloro reacciona muy rápidamente con el ozono. También tienen lugar reacciones similares entre el bromo y el ozono.

- c.- ¿Procede la mayoría del cloro en la estratosfera de fuentes humanas o de fuentes naturales?*

La mayoría del cloro en la estratosfera está allí como consecuencia de actividades humanas.

La mayoría de los compuestos que contienen cloro se liberan en la superficie. Aquéllos que se disuelven en agua no pueden llegar en cantidades importantes a altitudes estratosféricas. Los volcanes pueden emitir grandes cantidades de cloruro de hidrógeno pero este gas se convierte rápidamente en ácido clorhídrico que se disuelve en el agua de la lluvia, hielo y nieve y no llega a la estratosfera. Por último, aunque los gases de escape de los transbordadores espaciales y de algunos misiles inyectan partes de cloro directamente en la estratosfera, sus cantidades son muy pequeñas (menos del 1% de la aportación anual de halocarbonados en la atmósfera actual). Por contraste, la mayoría de los halocarbonados producidos por el hombre que agotan la capa de ozono, - tales como los clorofluorocarbonados (CFC) y el tetracloruro de carbono (CCl₄) - no son solubles en agua, no reaccionan con la nieve o con otras superficies naturales y no se descomponen químicamente en la atmósfera inferior. Finalmente, el aumento del cloro estratosférico total medido entre 1980 y 1998 corresponde a los aumentos conocidos de concentración de halocarbonados de producción humana durante dicho período.

d.- *¿Pueden atribuirse las modificaciones observadas en el ozono a cambios naturales tales como los producidos por el sol?*

Aunque hay causas naturales que producen fluctuaciones en las cantidades de ozono no existe ninguna evidencia de que haya cambios naturales que contribuyan de forma importante a la disminución del ozono observada en los últimos decenios.

e.- *¿Cuándo apareció por primera vez el agujero antártico de ozono? ¿Desde cuando existe la capa de ozono?*

El agujero antártico de ozono es un nuevo fenómeno que apareció a principios del decenio de 1980.

El promedio observado de ozono durante los meses de septiembre, octubre y noviembre sobre la estación de vigilancia del Antártico británico en Halley, Antártida, reveló por primera vez una disminución notable a principios del decenio de 1980, si se compara con datos precedentes obtenidos a partir de 1957. El agujero del ozono se forma cada año cuando hay una disminución aguda (actualmente de hasta el 60%) del ozono total sobre la mayor parte de la Antártida durante la primavera del hemisferio sur y a finales del verano los valores del ozono se recuperan.

La capa de ozono se formó hace más de tres mil millones de años cuando organismos marinos empezaron a producir oxígeno del agua y otros organismos iniciaron a poblar la tierra firme utilizando el oxígeno en la respiración. Consecuentemente el oxígeno empezó a llenar la atmósfera creando la capa de ozono a la altura requerida por el balance de creación y destrucción del ozono por la radiación ultravioleta.

f.- *¿Porqué ha aparecido el agujero del ozono por encima de la Antártida ocurriendo la liberación de CFC y de halones principalmente en el hemisferio norte?*

La atmósfera de la Tierra está continuamente agitada sobre el globo por los vientos. El resultado es que los gases que agotan la capa de ozono se mezclan por toda la atmósfera, incluida la Antártida, sea cual fuere el lugar en el que han sido emitidos.

Los vientos impulsan esta masa de aire hacia los polos tanto al Polo Norte como al Polo Sur desde los trópicos, de forma que el aire en toda la estratosfera del globo contiene aproximadamente las mismas cantidades de cloro y de bromo.

Las temperaturas muy bajas en la estratosfera de los polos llevan a la formación de nubes (nubes estratosféricas polares) que son responsables de las modificaciones químicas que promueven la producción de cloro y bromo químicamente activos. Esta activación del cloro y del bromo lleva seguidamente a una pérdida rápida del ozono cuando la luz del sol vuelve a la Antártida en septiembre y octubre de cada año, lo cual lleva seguidamente al agujero antártico de ozono.

No existen condiciones similares por encima del Ártico. Las temperaturas invernales en la estratosfera Ártica no son constantemente bajas durante muchas semanas como ocurre en la Antártida lo cual lleva a un agotamiento consiguientemente menor del ozono.

g.- *¿Hay un agujero de ozono por encima del Ártico?*

Se han observado importantes disminuciones del contenido de ozono en la estratosfera por encima del Ártico durante finales del invierno y principios de la primavera boreal (enero-marzo) en seis de los últimos nueve años. Sin embargo, estas disminuciones, ordinariamente del 20 al 25% son muy inferiores a las observadas actualmente cada primavera por encima de la Antártida (agujero de ozono).

h.- ¿Produce el agotamiento de la capa de ozono un aumento de la radiación ultravioleta al nivel del suelo?

En promedio el agotamiento de la capa de ozono lleva a un aumento de la radiación ultravioleta a nivel del suelo. Los científicos están de acuerdo en que, a falta de modificaciones en las nubes o en la contaminación, la disminución del ozono atmosférico lleva consigo aumentos de la radiación UV a nivel del suelo.

Las disminuciones mayores del ozono durante los últimos quince años se han observado por encima de la Antártida, especialmente durante cada uno de los meses de septiembre y octubre cuando se forma el agujero de ozono. En los últimos años, se han efectuado mediciones simultáneas de la radiación UV y del ozono total en varias estaciones antárticas. A finales de la primavera, la radiación ultravioleta biológicamente nociva en partes de la Antártida puede exceder de la observada en San Diego California, donde el sol está mucho más elevado por encima del horizonte.

i.- ¿Es el agotamiento del ozono una de las causas de los cambios climáticos?

El agotamiento del ozono y los cambios climáticos están relacionados de varios modos, pero el agotamiento del ozono no es la causa directa de los cambios climáticos.

El ozono atmosférico influye de dos formas en el equilibrio de las temperaturas de la Tierra. Absorbe la radiación ultravioleta solar que calienta la estratosfera y absorbe la radiación infrarroja emitida por la superficie de la tierra.

El aumento de dióxido de carbono es el aporte principal al cambio climático. Las concentraciones de dióxido de carbono están aumentando en la atmósfera, primariamente como resultado de la quema de carbón, petróleo, y gas natural para energía y transporte. En la actualidad, la abundancia en la atmósfera de dióxido de carbono es un 30% mayor aproximadamente de la que existía hace 150 años.

Hay también un factor adicional que enlaza indirectamente el agotamiento del ozono con los cambios climáticos; es decir muchos de los mismos gases que están produciendo el agotamiento del ozono contribuyen también a cambios climáticos. Estos gases, tales como los clorofluorocarbonados (CFC), son gases de invernadero, que absorben parte de la radiación infrarroja remitida por la superficie de la Tierra, por lo que se produce un calentamiento eficaz de la superficie de la Tierra.

j.- ¿Cómo es en la actualidad el grado de agotamiento de la capa de ozono?

El agotamiento de la capa de ozono estratosférico, causado por un aumento de las concentraciones de sustancias químicas producidas por el hombre ha aumentado desde el decenio de 1980. La pérdida primaveral en la Antártida es el agotamiento de mayor magnitud. En la actualidad, en las regiones no polares, la capa de ozono se ha agotado en varios números de porcentajes si se compara con lo observado hace dos decenios.

Desde finales del decenio de 1970, se ha formado el agujero del ozono por encima de la Antártida durante cada una de las primaveras en el hemisferio sur (de septiembre a noviembre), en el cual se ha agotado hasta el 60% del total de ozono. Desde principios del decenio de 1990, se ha observado también el agotamiento del ozono por encima del Ártico, con pérdidas del ozono desde enero hasta finales de marzo ordinariamente del 20 al 25% en la mayoría de los años recientes. Todas estas disminuciones son superiores a las variaciones naturales observadas a largo plazo.

k.- ¿Se prevé una recuperación de la capa de ozono? De ser así, ¿cuándo?

Se espera que el agotamiento del ozono causado por los compuestos de cloro y de bromo de producción humana desaparezca gradualmente a mediados del siglo XXI a medida que estos compuestos se retiran lentamente de la estratosfera mediante procesos naturales. Este logro medioambiental se debe al hito de acuerdos internacionales para prohibir la producción y consumo de sustancias que agotan la capa de ozono. Se requerirá un cumplimiento completo para lograr esta recuperación prevista.

Sin embargo, la situación futura de la capa de ozono no depende meramente de las concentraciones estratosféricas de cloro y de bromo producidos por el hombre. También está influenciada, hasta cierto punto, por las cantidades atmosféricas cambiantes de varios otros constituyentes de influencia humana tales como metano, óxido nitroso, y partículas de sulfatos, así como por el clima cambiante de la tierra. En consecuencia, no es seguro que la capa de ozono sea idéntica a la que existía antes del decenio de 1980. No obstante, el descubrimiento y la caracterización del agotamiento del ozono como consecuencia de los compuestos de cloro y de bromo y el cumplimiento pleno en todo el mundo de la reglamentación internacional acerca de sus emisiones habrán eliminado lo que hubiera sido un deterioro importante de la pantalla protectora de rayos ultravioletas de la tierra.

l.- ¿Podemos hacer algo individualmente para evitar la reducción de la capa de ozono?

Hoy en día, gracias a los convenios internacionales, el aporte individual para evitar el agujero ha disminuido. Sin embargo todavía es necesario que se tome una que otra medida. Por ejemplo en el caso de los refrigeradores antiguos, hay que evitar fugas de gases refrigerantes y reemplazar los refrigeradores viejos en centros especializados de reciclaje. Todos los productos actualmente usados deberían excluir CFC de sus compuestos.

m.- ¿Qué lección podemos aprender de los eventos que produjeron el agujero de ozono?

La fragilidad de la Tierra ha sido puesta en evidencia por la acción, involuntaria pero dañina del hombre. A raíz de la crisis del ozono, el hombre ha aprendido que cualquier intervención en el medio ambiente produce un impacto que precisa ser analizado, para mantener el precario equilibrio de la naturaleza. De hecho el concepto tan de moda de “desarrollo sostenible” nació a raíz del descubrimiento del agujero de ozono.

A-2. GLOSARIO

Aerosoles

Partículas microscópicas líquidas o sólidas suspendidas en un medio gaseoso.

Albedo

Es el cociente entre la luz reflejada e incidente. La nieve tiene un alto valor (0.9) mientras que la vegetación lo tiene bajo (0.1).

Anomalía

Diferencia entre el valor de una variable en un momento dado y su promedio durante un período largo.

Ártico

Región polar del Norte.

Antártica

Región polar del Sur.

Ángulo cenital

Es el ángulo que forma el Sol con respecto a la dirección vertical.

Biósfera

Parte de la tierra donde existe vida: comprende por lo tanto los océanos y parte de la atmósfera, incluyendo toda la superficie terrestre y su cobertura vegetal y animal.

Biomasa

Material orgánico no fósil de origen biológico por ejemplo árboles y plantas.

Brewer

Espectrómetro usado para medir la capa de ozono.

Cataratas

Opacidad del cristalino del ojo, o de su cápsula, o del humor que existe entre una y otra, y que impide el paso de los rayos luminosos produciendo diferentes niveles de ceguera.

Circulación y difusión atmosférica

Movimientos del aire a nivel planetario o hemisférico que pueden ser tratados por ecuaciones de movimiento, en contraste con la difusión atmosférica que, por ser por consistir en movimientos aleatorios y lentos, no es susceptible de ser tratada con esas ecuaciones.

Clorofluorocarbonados (CFC)

Son gases de invernadero, que absorben parte de la radiación infrarroja emitida por la superficie de la tierra, por lo que se produce un calentamiento eficaz de la superficie de la tierra. Son productos industriales que eran usados comúnmente en la industria ejemplos son aerosoles, refrigeración y solventes. Son químicamente inertes en la atmósfera baja mientras que en la atmósfera alta se descomponen por los rayos UV.

Constante solar

Es la cantidad de energía que incide en el exterior de la atmósfera por unidad de tiempo sobre una superficie situada perpendicularmente a los rayos cuando la Tierra se encuentra a su distancia media del Sol.

Dobson Unit (DU)

Unidad de medida de ozono equivalente a la cantidad de éste contenida en un espesor de una centésima de milímetro en condiciones normales de presión y temperatura (760 mm de Hg y 0 °C). Así, si al trasladar todo el ozono de la atmósfera al nivel del mar y a una temperatura de 0 °C se obtuviese una capa de 3 mm de espesor, se diría que el contenido de ozono es de 300 unidades Dobson.

Dosis de exposición (también ver MED)

Se comprende como la energía por unidad de área que una superficie horizontal recibe a lo largo de un tiempo fijo (dosis diaria, dosis horaria).

Efecto Invernadero

Calentamiento que experimenta la Tierra debido a que la atmósfera es más permeable a la radiación solar de onda corta que a la radiación infrarroja reflejada por la Tierra. Se diferencia del calentamiento global, en cuanto este último es una patología del efecto invernadero debida a la descarga en la atmósfera de sustancias producidas por el hombre como los CFC y los gases producto de la combustión de fósiles., cuyo efecto global es incrementar la temperatura media del planeta.

Espectrómetro

Aparato que permite realizar mediciones exactas de las longitudes de onda del espectro.

Eritema solar

Inflamación superficial de la piel, caracterizada por manchas rojas, producto de la exposición al sol.

Estratósfera

Capa de la atmósfera que se extiende entre 10 y 50 km de altura, dependiendo de la latitud.

Exosfera

Espacio interplanetario, exterior a la atmósfera terrestre (> 400 km sobre la Tierra).

Fitoplancton

Plancton constituido predominantemente por organismos vegetales, como ciertas algas.

Foto-disociación

Disociación de una molécula mediante la absorción de un fotón.

Foto-ionización

Disociación de una molécula mediante la absorción de un fotón dando como resultado un ión.

Fotosíntesis

Función desarrollada por los organismos vegetales verdes consistentes en la producción de compuestos químicos superiores a partir de sustancias básicas sencillas utilizando la energía solar con la clorofila como catalizador.

Fuerza de Coriolis

Fuerza que desvía el viento o la trayectoria de un objeto en movimiento, haciendo que se curve con respecto a la rotación de la Tierra.

Gas Traza

Gases que se encuentran en la atmósfera en pequeñas y variables concentraciones.

Halocarbonados

Compuestos que contienen cloro, bromo o flúor junto con carbono. Tales productos son responsables por la destrucción de la capa de ozono y además contribuyen al calentamiento global.

Insolación

Radiación solar recibida en la superficie de la Tierra.

Invierno solar

Término acuñado para indicar el periodo de intenso frío que seguiría a una conflagración nuclear generalizada

Ionosfera

Capa de la alta atmósfera sobre la estratosfera que está parcialmente ionizada.

Irradiancia

La cantidad de energía que incide sobre una superficie en cierta cantidad de tiempo. Sus unidades son W/m^2 , o sea, potencia por unidad de superficie (llamada también intensidad).

Índice de Radiación Ultravioleta (IUV)

Es un indicador de la intensidad de RUV recibida.

Lidar (Light detection and ranging)

Instrumento cuya técnica de medida es similar a la del radar pero usando radiación ultravioleta, visible o infrarroja en lugar de ondas de radio.

Lluvia ácida

Agua de lluvia con un elevado pH debido al gran número de aerosoles de cloro azufre y otros iones negativos que contiene como consecuencia de la actividad industrial.

MED (Minimal erythemal dose)

Dosis mínima de radiación ultravioleta que causa un eritema.

Melanina

Pigmento de color negro o pardo que existe en forma de gránulos en el protoplasma de ciertas células de los vertebrados y al cual deben su coloración principalmente la piel y pelos

Melanoma

Tumor de la piel caracterizado por una concentración de células de color oscuro. Este tumor puede ser benigno o maligno.

Mesosfera

Capa de la atmósfera que se extiende entre 50 y 100 km de altura.

Nubes estratosféricas

Son nubes de hielo y partículas de agua que actúan en la estratosfera como reservorios de los radicales de cloro que destruyen el ozono.

OMM

Organización Meteorológica Mundial (WMO, en inglés).

OMS

Organización Mundial de la Salud (WHO, en inglés).

Ozono

Gas traza compuesto de tres átomos de Oxígeno (O_3), que se encuentra en pequeñas cantidades en la atmósfera (principalmente en la estratosfera, donde forma la capa de ozono).

Plancton

Conjunto de organismos animales y vegetales, generalmente diminutos, que flotan y son desplazados pasivamente en aguas saladas o dulces.

Protocolo de Montreal (Montreal 1987)

Es un convenio firmado por muchos países con el propósito de reducir la producción y uso de CFC. Este convenio fue uno de los pasos más importantes en la limitación al daño a la capa de ozono.

Radiosonda

Equipo capaz de realizar medidas de distintos parámetros atmosféricos a bordo de globos sonda y transmitidos directamente a tierra.

Radiación difusa

Radiación solar dispersada o absorbida y re-emitida por la atmósfera.

Radiación directa

Radiación que llega en línea recta del sol, sin haber sido dispersada.

Radiación global

Radiación total que comprende la radiación difusa y directa

Termosfera

Capa de la atmósfera ubicada entre 100 y 400 km de altura.

TOMS (Total Ozone Mapping Spectrophotometer)

Espectrómetro puesto en órbita por la NASA, primero a bordo del satélite Nimbus 7 y luego (desde 1996 hasta la fecha) en el satélite Earth Probe. Ese instrumento proporciona el valor diario del ozono y de la radiación ultravioleta para diferentes localidades de la Tierra.

Tropopausa

Importante región de la atmósfera que actúa como interfaz entre la troposfera y estratosfera.

Troposfera

Capa de la atmósfera que comprende desde la superficie de la Tierra hasta los 10-18 km de altura, dependiendo de la latitud

UVA

Radiación electromagnética en el rango 315 – 400 nm

UVB

Radiación electromagnética en el rango 280 – 315 nm

UVC

Radiación electromagnética en el rango 100 – 280 nm

UVR

Radiación electromagnética en el rango 100 – 400 nm

Vida media de un compuesto

Es el tiempo requerido para que la concentración del mismo alcance $1/e$ ($\sim 1/2.7$) de su valor inicial donde e es la exponencial correspondiente a los logaritmos naturales.

Zooplankton

Plancton constituido predominantemente por organismos vegetales, como ciertas algas.

A-3. Respuestas a las preguntas de la sección A-1.2.

a.- *Falso.*

Aunque las nubes atenúan la radiación UV, la radiación difusa es suficientemente intensa como para quemarte, a no ser que las nubes sean bajas y gruesas.

b.- *Verdadero.*

La piel humana y el sistema inmunológico son sensibles a la radiación UV durante todo el ciclo vital.

c.- *Falso.*

Las cremas solares protegen, pero su eficacia decrece después de la aplicación. No se debe estar al sol más tiempo del indicado por el "Factor de Protección Solar" (SPF).

d.- *Verdadero.*

Debido a la mayor elevación solar, la radiación solar UV es muy alta en las horas centrales del día.

e.- *Falso.*

La radiación UV no se siente porque es absorbida por las capas más externas de la piel. La sensación de calor procede de la radiación infrarroja, no de la UV.

f.- *Verdadero.*

Las quemaduras de piel son posiblemente el efecto más conocido, pero la radiación UV puede dar lugar al desarrollo de cataratas y a ceguera transitoria en lugares nevados.

g.- *Falso.*

Las cremas solares sólo protegen durante algún tiempo, después del cual la exposición a la radiación UV es dañina y muchas aplicaciones sucesivas pueden causar problemas dermatológicos.

h.- *Verdadero.*

La gente con esta combinación de piel y pelo es el grupo de población más sensible.

i.- Falso.

El bronceado es una reacción de la piel a la exposición a la radiación UV y sólo protege parcialmente.

j.- Verdadero.

La capacidad del cuerpo humano de proteger y reparar daños producidos por la radiación UV decrece a lo largo de la vida.

k.- Falso.

La intensidad UV depende también de la latitud, de la altitud y de la reflexión del suelo, como por ejemplo la nieve. En la región Andina los niveles de UV en invierno son muy elevados en comparación con zonas anivel del mar.

l.- Verdadero.

Debido a la mayor sensibilidad de su piel y a los efectos acumulativos de las quemaduras.

m.- Verdadero.

La radiación solar directa y la radiación difusa reflejada por el suelo son igualmente importantes.

n.- Falso.

El tiempo de exposición necesario para la producción de vitamina D es tan corto, que es suficiente con la radiación UV recibida durante nuestras actividades diarias al aire libre.

o.- Verdadero.

Cuando las sombras son cortas la elevación solar es alta y la radiación solar es más intensa.

p.- Falso.

El agua atenúa la radiación UV, pero te puedes quemar más fácilmente nadando.

q.- Verdadero.

Cuanto mayor es la altitud, la atenuación de la radiación UV por la atmósfera es menor.

r.- Verdadero.

La sombra protege de los rayos directos del sol, pero de todos modos hay que protegerse de la radiación difusa.

Perfil del Laboratorio de Física de la Atmósfera

El Laboratorio de Física de la Atmósfera (LFA) nace a fines de 1995 con el nombre de Laboratorio de Ozono y Radiación Ultravioleta (LORUV), como un proyecto del Instituto de Investigaciones Físicas de la Universidad Mayor de San Andrés.

Su desarrollo se debió, en gran parte, a la cooperación externa, principalmente al Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE-Brasil), al Fondo de Pequeñas Donaciones del PNUD (Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo), al Fondo Nacional del Medio Ambiente (Proyecto ELA-FONAMA), a la Organización Panamericana de la Salud (OPS/OMS) y al Fondo Argentino de Cooperación Internacional (FO-AR).

El LFA fue concebido para incorporar a la física y a los físicos a la investigación del medio ambiente y, al mismo tiempo, para alertar a la población de ciudades de altura —como La Paz, ubicada a 3650 m s.n.m.— sobre los elevados índices de radiación ultravioleta. En efecto, el LFA persigue, al mismo tiempo, objetivos científicos y sociales (educación, difusión y asesoramiento).

A pesar de su corta existencia, el Laboratorio ha publicado más de 15 artículos científicos y dos libros, ha adquirido presencia en el contexto regional e internacional de la física de la atmósfera y ha ganado dos importantes premios nacionales, como mejor proyecto en el área de Ciencias Naturales en la EXPO-UMSA (1998) y en la EXPO UNIVERSITARIA (1998).

Mayores informaciones en la página web:

www.megalink.com/ozono

FICHA BIBLIOGRÁFICA

BO WD605 Z36r	Zaratti Sacchetti, Francesco ed. La radiación ultravioleta en Bolivia/ Francesco Zaratti Sacchetti, ed. y Ricardo Forno Gisbert ed. —La Paz: OPS/OMS, 2002. 468 p
---------------------	--

- I. RADIACION
- II. RADIACION SOLAR
- III. t.
 1. Forno Gisbert, Ricardo ed.