

Cambios en la viabilidad de dos bacterias marinas antárticas expuestas a la radiación solar en la columna de agua: influencia de la mezcla vertical

E. A. HERNÁNDEZ¹, W. P. MAC CORMACK^{2*}

¹Cátedra de Biotecnología, FFyB, UBA. Junín 956 6° piso (C1113AAD) Buenos Aires;

²IAA, Cerrito 1248 (C1010AAZ), Buenos Aires, Argentina.

*Correspondencia. E-mail: wmac@ffyb.uba.ar

RESUMEN

Se estudió el efecto de la radiación ultravioleta (RUV) sobre dos cepas bacterianas marinas antárticas (UVps y UVvi) en la columna de agua de la caleta Potter (Shetland del Sur, Antártida). Frascos de cuarzo con las cepas en estudio fueron expuestos a la radiación solar en superficie, a 1 m y a 3 m de profundidad. Se realizaron ensayos con exposición directa y con filtros interferenciales que discriminaron la radiación UVA y la UVB. En otros ensayos se simuló una mezcla vertical de 4 m/h. Ambas cepas mostraron una disminución significativa del número de unidades formadoras de colonias, tanto en superficie como a 1 m de profundidad, luego de exponerlas a dosis superficiales de UVB de 8,4 kJ m⁻². El estudio con filtros interferenciales mostró una disminución significativa de la viabilidad en ambos tratamientos UV en superficie y a 1 m. La cepa UVps mostró mayor sensibilidad a la UVB que a la UVA. La mezcla vertical amortiguó el daño causado por la UVB cuando la dosis en superficie fue de 4,8 kJ m⁻². Este efecto amortiguador no se observó cuando la dosis en superficie fue de 7,7 kJ m⁻². Estos resultados muestran que el efecto negativo de la RUV sobre el bacterioplancton sería particularmente importante en el primer metro de profundidad de las aguas costeras antárticas con abundante material particulado en suspensión.

Palabras clave: bacterias marinas, Antártida, radiación UV, mezcla vertical

ABSTRACT

Changes in viability of two Antarctic marine bacteria exposed to solar radiation in the water column: influence of vertical mixing. The effect of UV radiation on two Antarctic marine bacterial strains (UVps and UVvi) was studied in the water column of Potter Cove (South Shetland, Antarctica). Quartz flasks were filled with the bacterial suspensions and exposed to solar radiation at 0 m, 1 m and 3 m depth. Assays using flasks exposed to direct solar radiation and others using flasks covered with/by interferential filters which discriminate between UVA and UVB, were performed. In other assays, a vertical mixing of 4 m/h was simulated. Both strains showed a significant decrease in viability (expressed as colony - forming units) when exposed to a surface UVB dose of 8.4 kJ m⁻². Studies with interferential filters showed a significant decrease at 0 and 1 m depth under both UV treatments. The UVps strain appeared to be more sensitive to UVB than to UVA. Damage produced by UVB was attenuated by the vertical mixing when the surface UVB dose was 4.8 kJ m⁻². This effect was not observed when surface UVB dose was 7.7 kJ m⁻². These results show that the negative effect caused by UVB radiation on the bacterioplankton would be significant only in the first meter of water column of the Antarctic coastal waters with high levels of suspended particulate material.

Key words: marine bacteria, Antarctica, UV radiation, vertical mixing.

INTRODUCCIÓN

El adelgazamiento de la capa de ozono estratosférico ha producido cambios en la composición espectral de la radiación solar ultravioleta (RUV, 280-400 nm) que alcanza la superficie del continente antártico y el océano austral (23). Este fenómeno ha determinado un aumento en los niveles de radiación ultravioleta B (UVB, 280-320 nm), la fracción biológicamente más dañina del espectro de RUV que llega a la superficie terrestre, la cual es filtrada por la capa de ozono.

En el ecosistema marino antártico, las bacterias juegan un papel fundamental en el ciclo de la materia (2,

16) contribuyendo con hasta el 40% del carbono planctónico (5) y procesando hasta un 80% de la producción primaria (8). Dado que la radiación UV penetra hasta 30 m de profundidad en mares antárticos (17), tiene un fuerte efecto sobre los primeros metros de la columna de agua. Numerosos estudios mostraron que la radiación UVB produce daños directos en las bacterias marinas (25), las que parecen ser más susceptibles a la RUV que otros organismos planctónicos. La UVA (320-400 nm) parece afectar la viabilidad y actividad bacteriana (4, 9), aunque también está relacionada con la activación de mecanismos de reparación del ADN dañado, al igual que la radiación activa para fotosíntesis (RAF, 400-700 nm). Este

efecto de la RUV sobre el bacterioplancton depende del coeficiente espectral de atenuación de la columna de agua, así como del tiempo de exposición de los microorganismos que son pasivamente movidos por la mezcla vertical (14). Se ha reportado que en aguas oceánicas abiertas, una marcada estratificación de la capa superior es un fenómeno habitual, lo que expone a los microorganismos allí ubicados a un régimen constante de elevada radiación (7). Sin embargo, en aguas costeras relativamente confinadas y con importante aporte de aguas continentales, es frecuente la existencia de un sistema de mezcla significativo que mueve verticalmente las masas de agua superficiales y los microorganismos ubicados en ellas, determinando que la dosis de radiación recibida por esos microorganismos dependa también de dicho sistema de mezcla (19). Este es el caso de Caleta Potter (Shetland del Sur), Antártida, la zona elegida como sistema de estudio para este trabajo, en donde el aporte masivo de agua de deshielo y los fuertes vientos predominantes determinan una acentuada mezcla vertical durante los meses de primavera y verano (21). Estudios exhaustivos que consideraron los diferentes factores responsables de generar dicha mezcla (intensidad del viento, mareas, densidad del agua, etc.) en Caleta Potter reportaron 4,5 m como el valor promedio de transporte vertical para una estación oceanográfica situada en el interior de Caleta Potter (20), sitio muy cercano a la zona de realización de los presentes estudios.

Trabajos previos de exposición a la radiación solar en superficie de dos cepas microtolerantes aisladas en Caleta Potter (*Arthrobacter* UVvi y la cepa no identificada UVps, perteneciente a la división *Bacteroidetes*) mostraron un fuerte efecto deletéreo de ambas bandas de RUV, así como una sensibilidad diferente por parte de ambas cepas estudiadas. A fin de confirmar si estas observaciones reflejan lo que ocurre en el ambiente natural de estos microorganismos, los objetivos de este trabajo fueron: estudiar el efecto de la radiación solar sobre la viabilidad de dos cepas bacterianas marinas antárticas en los primeros metros de la columna de agua, discriminar los efectos de la RAF, UVA y UVB sobre estas cepas, y evaluar el efecto de la mezcla vertical en los 4 primeros metros de profundidad. Estos estudios se realizaron durante los meses de verano, cuando la irradiancia en superficie es máxima y podría, eventualmente, producir importantes cambios en la composición de la microflora marina antártica de los primeros metros de la columna de agua.

MATERIALES Y MÉTODOS

Los experimentos se realizaron en Caleta Potter, Base Jubany (Argentina), Isla 25 de Mayo (Rey Jorge), 62°14'S, 58°40'O, Archipiélago Shetland del Sur, Antártida (Fig. 1). Se utilizaron dos cepas bacterianas previamente aisladas de la caleta Potter: UVps (un bacilo gram-negativo perteneciente al grupo *Flavobacterium-Cytophaga-Bacteroides*, dentro de la división *Bacteroidetes*) y UVvi (un bacilo gram-positivo pleomórfico perteneciente al género *Arthrobacter*) (11).

Se realizaron 4 experimentos utilizando suspensiones de las cepas contenidas en frascos Erlenmeyer de cuarzo de 50 ml (con tapa esmerilada), los que fueron expuestos a la radiación solar en la columna de agua. Las cepas fueron previamente cultivadas en oscuridad, en caldo nutritivo rehidratado con agua de mar. A partir de estos cultivos se prepararon en agua de mar estéril las suspensiones utilizadas en los experimentos, cuyas concentraciones iniciales se encontraron entre 10^5 y 10^6 unidades formadoras de colonias (UFC) por ml. Todos los experimentos se realizaron desde botes de goma (Zodiac). En los dos primeros (Exp. 1 y 2) se utilizó un soporte metálico mantenido en superficie por 4 boyas, que sostenía a su vez soportes similares ubicados a 1 y 3 metros de profundidad. Sobre cada uno de los soportes se ubicaron los frascos de cuarzo con las suspensiones bacterianas (Fig. 2). En el experimento 1, realizado el 8 de febrero de 1998 entre las 11 y las 19 h, no se usaron filtros interferenciales; en cambio, en el experimento 2, realizado el 26 de febrero de 1998 entre las 11 y las 17 h, se cubrieron los frascos de cuarzo con filtros solares interferenciales. Se usaron filtros PlexiglasUF3 opacos a radiación menor a 400 nm (tratamiento RAF), filtros Mylar opacos a radiación menor a 320 nm (tratamiento UVA) y sin filtros (tratamiento UVA+UVB). En los otros dos experimentos (Exp. 3 y 4), realizados entre las 11:30 y las 14:30 h, se analizó el efecto de una mezcla vertical simulada de 4 m h^{-1} , entre la superficie y los 4 m de profundidad, en dos días con diferentes valores de irradiancia. (15 de febrero y 24 de marzo de 2003, respectivamente). Para ello, además del sistema previamente descrito para superficie en los experimentos 1 y 2, se agregó un soporte móvil accionado por un brazo mecánico que permitía variar su profundidad. Sobre este soporte, los frascos de cuarzo se mantuvieron 15 minutos a 4 m de profundidad y luego se desplazaron hacia la superficie a distancias de 1 metro, manteniéndolos en cada profundidad durante 15 minutos. Luego de tomar una muestra en superficie, se continuó con el procedimiento hasta realizar un ciclo completo adicional, finalizando el estudio en la superficie. En todos los experimentos descritos los tratamientos se realizaron por triplicado y contaron con botellas negras como control en oscuridad. En todos los experimentos se evaluó la viabilidad de las cepas mediante la estimación de las UFC ml^{-1} . Los cultivos se realizaron por duplicado en placas de Petri con agar nutritivo (2216 Merck) rehidratado con agua de mar previamente filtrada ($0,22 \mu\text{m}$) y autoclavada (15 min a $121 \text{ }^\circ\text{C}$). El valor de recuento se calculó a partir de las placas con diluciones que permitieron contar entre 30 y 300 UFC por placa.

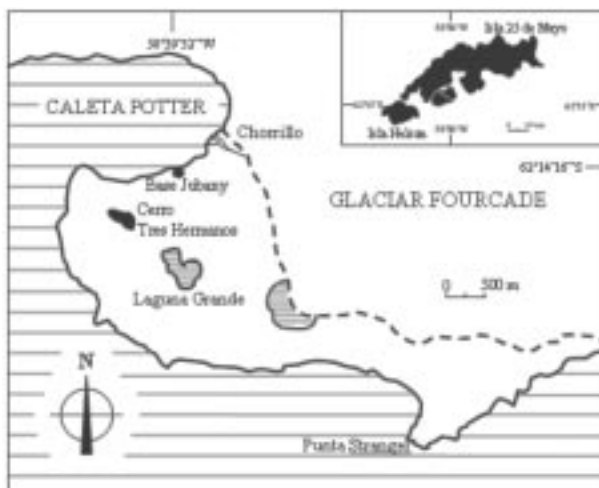


Figura 1. Ubicación de la caleta Potter y de la base Jubany (Argentina) en la Isla 25 de Mayo (Rey Jorge), 62°14'S, 58°40'O, Archipiélago Shetland del Sur, Antártida.

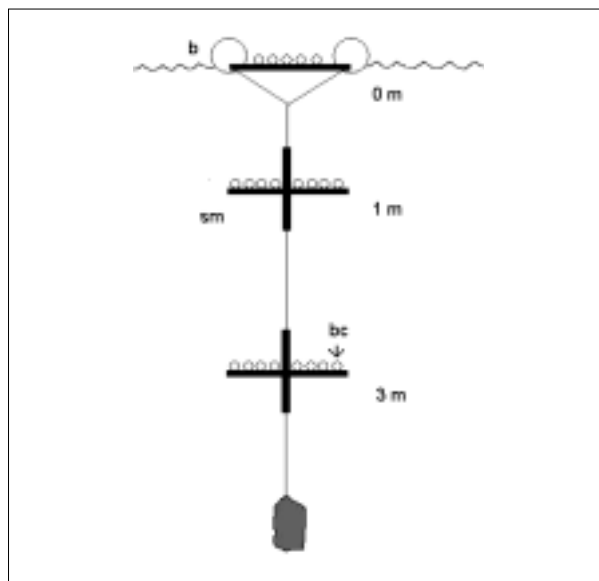


Figura 2. Esquema del sistema experimental ubicado en la columna de agua y utilizado en los experimentos 1 y 2. Los soportes metálicos (sm) fueron mantenidos en la superficie por 4 boyas (b). Sobre cada uno de los soportes se ubicaron las botellas de cuarzo (bc) con las suspensiones bacterianas. Ver detalles en la sección Materiales y Métodos.

La radiación solar se midió en superficie utilizando un espectrorradiómetro Bentham DM 150, el cual posee un sistema de detección multicanal. Este sistema registra datos de UV cada segundo en el rango 290 a 320 nm, y almacena los datos como el promedio de cada minuto. Bajo el agua, la radiación se midió mediante un equipo PUV 500 (Biosferical), con el que se registraron los datos de RAF y de RUV de las siguientes bandas: 380, 360, 320 y 305 nm, con una frecuencia de 5 segundos. Se calculó el coeficiente de atenuación de la luz de acuerdo con Kirk (18):

$$Kd_{(z)} = 1/z \cdot \ln(I_0/I_z);$$

donde I_0 es la irradiancia incidente en superficie e I_z es la irradiancia incidente a la profundidad z , para una determinada longitud de onda (1).

Los valores de viabilidad fueron analizados estadísticamente utilizando ANOVA de medidas repetidas y test de comparaciones múltiples de Tukey.

RESULTADOS

Cuando las cepas se ubicaron a profundidades fijas de una columna de agua cuyo $K_{d(305)}$ (coeficiente de atenuación para 305 nm) fue de $2,38 \text{ m}^{-1}$ (Exp. 1, Fig. 3), se observó que después de 2 horas de exposición a altas dosis de UVB en superficie (mayores de $8,4 \text{ kJ m}^{-2}$), ambas cepas mostraron un significativo aumento de la mortalidad ($p < 0,05$) con respecto al control en oscuridad. Estos valores de UVB son considerados altos porque representan más de la cuarta parte de la dosis diaria promedio en la zona de la base Jubany, que es de alrededor de $29,9 \text{ kJ m}^{-2}$ para enero, según lo reportado por Hoyer y colaboradores (13). La mortalidad fue menor para la cepa *Arthrobacter* UVvi (50%) que para UVps (90%). A

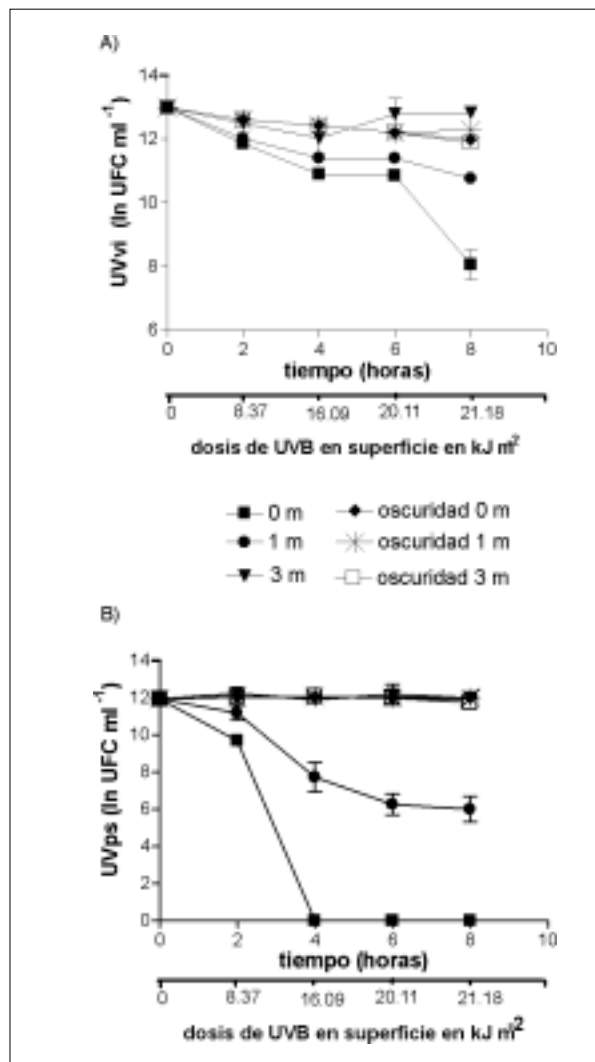


Figura 3. Efecto de la radiación solar sobre la viabilidad de las cepas *Arthrobacter* UVvi y UVps mantenidas a 0, 1 y 3 m en la columna de agua. Se muestran las dosis de UVB en superficie.

tiempo final (8 h), cuando la dosis fue de $21,18 \text{ kJ m}^{-2}$, la mortalidad en ambas cepas superó el 99%. A 1 metro de profundidad la dosis de UVB a las 2 h fue de $2,09 \text{ kJ m}^{-2}$. En este periodo la mortalidad observada para ambas cepas fue del 55%. Sólo se observaron diferencias significativas entre las cepas a las 6 h de exposición, cuando *Arthrobacter* UVvi alcanzó un valor de mortalidad del 75% y UVps superó el 99%. A 3 metros de profundidad se obtuvieron valores de viabilidad similares al control en oscuridad con ambas cepas. A esa profundidad, la atenuación de la radiación UVB fue alta, observándose una dosis de UVB de $0,008 \text{ kJ m}^{-2}$ (Tabla 1).

En el experimento 2, realizado en una columna de agua cuyo $K_{d(305)}$ fue de $1,74 \text{ m}^{-1}$, los frascos de cuarzo que contenían las suspensiones bacterianas fueron cubiertos con filtros interferenciales que determinaron los tratamientos RAF, UVA y UVA+UVB (Tabla 2). Bajo es-

tas condiciones, se registró a tiempo final (6 h) una dosis total de UVB en superficie de 9,5 kJ m⁻² (Tabla 1). En este caso, para la cepa *Arthrobacter* UVvi se observaron efectos negativos similares en ambos tratamientos UV con respecto a los tratamientos RAF y oscuridad (p<0,05),

tanto en superficie como a 1 m. En comparación con los tratamientos RAF y oscuridad, la cepa UVps también mostró altos valores de mortalidad bajo radiación UV (p<0,05), en superficie y a 1 m de profundidad. Sin embargo, a diferencia de lo observado con la cepa *Arthrobacter* UVvi, los valores a 1 m fueron significativamente mayores en el tratamiento UVA+UVB (p<0,001) que en el tratamiento UVA (p<0,05). A 3 metros de profundidad, solamente la cepa UVps mostró sensibilidad a la UVB (50% de mortalidad). En todos los casos, no se observaron diferencias significativas (p>0,05) entre el control en oscuridad y el tratamiento RAF los cuales, además, mostraron valores similares a tiempo inicial y final.

Los dos experimentos desarrollados bajo el régimen de mezcla vertical simulada de 4 m h⁻¹ (Fig. 4) se realizaron bajo diferentes regímenes de RUV. Durante el experimento 3 (Fig. 4A), realizado un día con mayor radiación que en el experimento 4 y en una columna de agua con un K_{d(305)} de 1,95 m⁻¹, se observó una significativa disminución (p<0,05) en la viabilidad de ambas cepas en el sistema que se mantuvo fijo en superficie. La mezcla vertical simulada disminuyó ese valor de mortalidad a valores similares al control en oscuridad (p>0,05) durante la primera hora de exposición. Sin embargo, a las 3 horas, con una dosis de UVB de 7,7 kJ m⁻² en superficie, los valores de mortalidad observados bajo el régimen de mezcla vertical no mostraron diferencias significativas (p>0,05) respecto de los observados en el sistema fijo

Tabla 1. Dosis de UVB recibidas por las suspensiones bacterianas en cada uno de los 4 experimentos realizados.

	Dosis de UVB (kJ m ⁻²)	
	2 h	6 h
Exp 1		
0 m	8,37	20,11
1 m	2,09	5,02
3 m	0,008	0,002
Exp 2		6 h
0 m	-	9,50
1 m	-	1,90
3 m	-	0,04
Exp 3	1 h	3 h
0 m	3,90	7,70
Mezcla (4 m h ⁻¹)	0,16	2,27
Exp 4	1 h	3 h
0 m	1,90	4,80
Mezcla (4 m h ⁻¹)	0,18	1,46

El experimento 2 fue realizado utilizando filtros interferenciales y en los experimentos 3 y 4 se simuló una mezcla vertical de 4 m h⁻¹

Tabla 2. Efecto de la radiación solar sobre la supervivencia (expresada como % del recuento a tiempo inicial) de las cepas *Arthrobacter* UVvi y UVps mantenidas a 0, 1 y 3 m en la columna de agua, cubiertas con filtros interferenciales. A tiempo final (6 h) la dosis de UVB en superficie fue de 9,5 kJ m⁻². Los asteriscos indican diferencias significativas con respecto al control en oscuridad correspondiente, *: p<0,05; **: p<0,01. DE: desviación estándar.

Tratamientos	UVvi					
	0 m		1 m		3 m	
	%UFC ml ⁻¹	DE	%UFC ml ⁻¹	DE	%UFC ml ⁻¹	DE
RAF+UVA+UVB	24,33*	0,39	56,00*	1,97	91,30	3,69
RAF+UVA	24,78*	4,30	49,57*	3,69	104,35	4,92
RAF	82,61	3,69	102,61	27,05	90,43	22,14
OSCURIDAD	87,83	3,69	92,17	2,46	86,96	4,92
Tratamientos	UVps					
	0 m		1 m		3 m	
	%UFC ml ⁻¹	DE	%UFC ml ⁻¹	DE	%UFC ml ⁻¹	DE
RAF+UVA+UVB	0,007**	0,001	0,066**	0,004	52,53*	6,27
RAF+UVA	0,066**	0,004	26,52*	2,70	98,10	17,01
RAF	93,67	12,53	108,86	10,74	93,67	17,90
OSCURIDAD	110,13	30,43	110,76	42,07	107,59	42,96

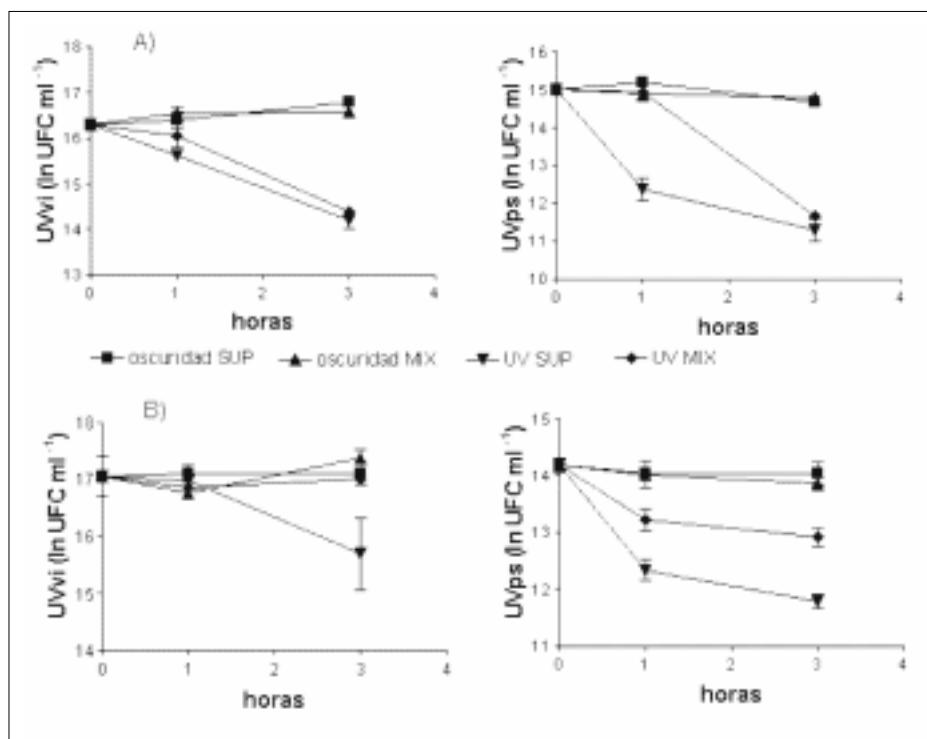


Figura 4. Efecto de la radiación solar sobre la viabilidad de las cepas *Arthrobacter* UVvi y UVps sometidas a una mezcla vertical simulada de 4 m h⁻¹, entre los 0 y los 4 m de profundidad. A) experimento 3, realizado en un día con alta radiación (dosis de UVB en superficie: 7,7 kJ m⁻²) y B) experimento 4, realizado en un día con baja radiación (dosis de UVB en superficie: 4,8 kJ m⁻²).

en superficie. En el otro experimento de simulación de mezcla vertical (Exp 4), desarrollado a dosis más bajas de radiación (4,8 kJ m⁻²) y con un valor de $K_{d(305)}$ de 1,24 m⁻¹, se observó que la mezcla vertical atenúa significativamente ($p < 0,05$) los efectos deletéreos de la RUV superficial en ambas cepas (Fig. 4B). Sin embargo, mientras la cepa *Arthrobacter* UVvi no mostró diferencias entre el sistema de mezcla vertical simulada y los controles en oscuridad ($p > 0,05$), la cepa UVps, por el contrario, mostró diferencias significativas en los valores de viabilidad observados en el sistema de mezcla vertical, comparado con los controles en oscuridad ($p < 0,05$). De todas formas, la mortalidad de la cepa UVps sometida a la mezcla vertical fue significativamente menor a la observada en el sistema fijo superficial. Los datos de dosis de UVB recibidas por los sistemas en superficie y bajo la mezcla vertical simulada se muestran en la tabla 1.

DISCUSIÓN

Estudios previos realizados por nuestro grupo de trabajo y otros investigadores han mostrado que las bacterias marinas antárticas se ven afectadas por la radiación solar que llega a la superficie (6, 10). Si bien los mayores efectos deletéreos se observaron cuando los microorganismos fueron expuestos a la radiación solar total, son numerosos los trabajos que reportan un efecto negativo

significativo de la UVA cuando la fracción UVB ha sido filtrada (22, 4). Dado que esta situación de exposición permanente a los niveles de radiación que llegan a la superficie no es una condición frecuente y que solo se daría en situaciones particulares, tales como la formación de pozas de marea o zonas con muy alta estratificación en superficie, en este trabajo se analizó el efecto atenuante de la columna de agua, no solo como un sistema fijo sino también con la dinámica que le aporta el fenómeno de mezcla vertical.

La respuesta observada en la viabilidad de las cepas marinas estudiadas muestra que el efecto amortiguador de la radiación solar que realiza la columna de agua es prácticamente total a profundidades tan bajas como 3 m. La causa de este alto grado de amortiguación de la radiación es, al menos en parte, el importante caudal de material particulado en suspensión (MPS) existente en la época del año en que se realizó el estudio, lo que incrementa la atenuación de la penetración de la RUV. El deshielo de los glaciares costeros produce arroyos de importante caudal que arrastran gran cantidad de material terrígeno de naturaleza inorgánica (24). Esta observación es importante ya que, en el sistema en estudio, el MPS representa un importante factor de atenuación de los efectos deletéreos de la radiación que incide sobre el área en el periodo primavera-verano austral. Este efecto atenuador fue más evidente para la UVB, donde se ob-

servó que a 3 m la reducción en la irradiancia de UVB es del 99%. Por esta razón, el efecto negativo de la radiación solar sobre el bacterioplancton sería principalmente en el primer metro de profundidad. Esta situación es similar a la reportada por Wilhelm y colaboradores (26), quienes encontraron que la alta productividad asociada a las aguas someras de estaciones de muestreo cercanas a la costa del Golfo de México determinaba una disminución del 90% de la radiación UVB de 305 nm, a profundidades tan bajas como 1 m. Esta situación, frecuente en aguas costeras, no puede extrapolarse a las aguas abiertas con bajo MPS, en donde la radiación puede estar actuando sobre la biota a profundidades mucho mayores. En este sentido, Schloss y Ferreyra (20) han encontrado que en las zonas más externas de Caleta Potter, alejadas de la influencia del aporte terrígeno, una atenuación del 99% de la luz solar recién se observa entre los 15 y los 30 metros. En estas áreas, el efecto deletéreo de la RUV se extendería a profundidades mayores a las observadas en nuestro trabajo.

Los experimentos en donde se utilizaron filtros para discriminar las bandas RAF, UVA y UVB confirmaron lo anteriormente mencionado acerca del efecto deletéreo de la UVA. Además, los resultados sugieren diferencias interespecíficas en la sensibilidad a la RUV. La mayor resistencia a la radiación mostrada por la cepa *Arthro-bacter* UVvi, tanto en superficie como a 1 metro de profundidad, muestra que los efectos de la radiación pueden modificar la composición y/o la proporción de las diferentes especies que conforman el bacterioplancton de Caleta Potter. Si bien es una observación basada solamente en el análisis de dos cepas predominantes del ambiente en estudio, que deberá ser confirmada analizando la comunidad bacteriana completa, este efecto diferencial de la radiación sobre los diferentes integrantes de la comunidad microbiana podría tener profundas implicancias sobre el funcionamiento del ecosistema marino de Caleta Potter. Este efecto diferencial de la radiación ha sido reportado también por otros investigadores en otros ecosistemas marinos (1, 15).

Son escasos los trabajos que han analizado el efecto de la mezcla vertical *in situ*. Este fenómeno ha sido mencionado como un factor crucial para la supervivencia de las bacterias marinas frente a la letal exposición a la radiación superficial. Sin embargo Boelen y colaboradores (3), analizando los niveles de daño a ADN inducidos por la radiación, mostraron que en las aguas muy transparentes de Curaçao, las células planctónicas se encuentran bajo un fuerte estrés por acción de la UVB, a pesar de estar sujetas a la mezcla vertical. En nuestros ensayos la mezcla vertical mejoró la supervivencia de las cepas bacterianas, principalmente cuando los niveles de irradiancia fueron bajos. Sin embargo, a dosis de UVB mayores de 7 kJ m⁻², los niveles de mortalidad alcanzados fueron similares al observado en superficie, por lo

cual parecería existir una dosis de radiación más allá de la cual la mezcla vertical (simulada en este ensayo) deja de ser eficiente como factor atenuador de los daños producidos por la RUV. Estos resultados parecen estar de acuerdo con lo mencionado por Neale y colaboradores (19) en el sentido de que, si bien la mezcla vertical puede ser un factor atenuador de los efectos negativos de la RUV cuando los mecanismos de reparación de ADN son eficientes, por el contrario, podría incrementar el efecto deletéreo cuando dichos mecanismos no son eficientes. Esto se debería a que en una columna de agua estratificada, la mayor parte de los microorganismos estarían en mayor o menor medida protegidos de la radiación incidente en superficie, mientras que la mezcla vertical llevaría a esas células a las altas radiaciones presentes en superficie, en donde los poco eficientes mecanismos de reparación de esos microorganismos se verían superados. En nuestro caso, los mecanismos de reparación podrían no haber sido eficientes bajo las condiciones imperantes durante el experimento 3, al final del cual la dosis de UVB en el tratamiento de mezcla vertical fue de 2,27 kJ m⁻². En el experimento 4, la dosis en el tratamiento de mezcla vertical fue sustancialmente menor (1,46 kJ m⁻²). En estas condiciones se observó una menor mortalidad, lo que sugeriría que los mecanismos de reparación fueron capaces de atenuar el efecto de la UV comparado con el sistema en superficie. Esta posibilidad está apoyada en trabajos anteriores de nuestro grupo de investigación utilizando las mismas cepas (UVvi y UVps), en donde se observó que la mortalidad causada por una determinada dosis de UVB es independiente del tiempo en el cual se acumuló dicha dosis (12).

En conclusión, el presente trabajo representa un aporte original a la comprensión de la respuesta de bacterias sicrotolerantes antárticas a la radiación solar bajo una condición muy poco estudiada previamente, como lo es la mezcla vertical. Las cepas bacterianas marinas estudiadas mostraron ser sensibles a la radiación solar superficial en Caleta Potter. Esta sensibilidad se observó en superficie y en el primer metro de profundidad, y se manifestó tanto para la UVB como para la UVA. La existencia de una mezcla vertical de 4 m h⁻¹ redujo la mortalidad bacteriana, comparada con la observada en superficie cuando la dosis fue de 4,8 kJ m⁻². Sin embargo, dicha mezcla vertical no fue efectiva como mecanismo atenuador cuando el nivel de UVB alcanzó los 7,7 kJ m⁻².

Agradecimientos: Los autores agradecen al Instituto Alfred Wegener (AWI) por el aporte de material científico y el uso de las instalaciones del laboratorio Dallman, al personal de la base Jubany en las campañas de verano 1997-1998 y 2002-2003 y especialmente al Sr. Oscar González por su asistencia técnica en las tareas de campo. Este trabajo fue realizado bajo el marco del convenio entre el Instituto Antártico Argentino y la Facultad de Farmacia y Bioquímica de la Universidad de Buenos Aires, y financiado en parte por los proyectos IAA 40 y PICTA 10.

BIBLIOGRAFÍA

1. Arrieta JM, Weinbauer MG, Herndl GJ. Interspecific variability in sensitivity to UV radiation and subsequent recovery in selected isolates of marine bacteria. *Appl Environ Microbiol* 2000; 66: 1468-73.
2. Azam F, Fenchel T, Field JG, Gray JS, Meyer-Reil LA, Thingstad F. The ecological role of water-column microbes in the sea. *Mar Ecol Prog Ser* 1983; 10: 257-63.
3. Boelen P, Vernet MJW, Buma AGJ. Accumulation and removal of UVBR-induced DNA damage in marine tropical plankton subjected to mixed and simulated non-mixed conditions. *Aquat Microb Ecol* 2001; 24: 265-74.
4. Booth MG, Hutchinson LA, Brumsted M, Aas P, Coffin RB, Downer Jr RC, *et al.* Quantification of *recA* gene expression as an indicator of repair potential in marine bacterioplankton communities of Antarctica. *Aquat Microb Ecol* 2001; 24: 51-9.
5. Cho BC, Azam F. Biogeochemical significance of bacterial biomass in the ocean's euphotic zone. *Mar Ecol Prog Ser* 1990; 63: 253-9.
6. Davidson AT, van der Heijden A. Exposure of natural Antarctic marine microbial assemblages to ambient UV radiation: effect on bacterioplankton. *Aquat Microb Ecol* 2000; 21: 257-64.
7. Doney SC, Najjar RG, Stewart S. Photochemistry, mixing and diurnal cycles in the upper ocean. *J Mar Res* 1995; 53: 341-69.
8. Ducklow HW, Carlson CA. Oceanic bacterial production. En: Marshall KC, editors. *Advance in microbial ecology*. Plenum Press, New York, 1992, p 113-81.
9. Helbling EW, Marguet FR, Villafañe VE, Holm-Hansen O. Bacterioplankton viability in Antarctic waters as affected by solar ultraviolet radiation. *Mar Ecol Prog Ser* 1995; 126: 293-8.
10. Hernández EA, Ferreyra GA, Mac Cormack WP. Effect of solar radiation on two Antarctic marine bacterial strains. *Polar Biol* 2002; 25: 453-9.
11. Hernández EA, Ferreyra GA, Mac Cormack WP. Effect of solar radiation and the subsequent dark periods on two newly isolated Antarctic marine bacteria. *Polar Res* 2004; 23: 67-77.
12. Hernández EA, Ferreyra GA, Mac Cormack WP. Response of two Antarctic marine bacteria to different natural UV radiation doses and wavelengths. *Antarct Sci* 2006; 18: 205-12.
13. Hoyer K, Karsten U, Sawall T, Wiencke C. Photoprotective substances in Antarctic macroalgae and their variation with respect to depth distribution, different tissues and developmental stages. *Mar Ecol Prog Ser* 2001; 211: 117-29.
14. Huot Y, Jeffrey WH, Davis RF, Cullen JJ. Damage to DNA in bacterioplankton: a model of damage by ultraviolet radiation and its repair as influenced by vertical mixing. *Photochem Photobiol* 2000; 72: 62-74.
15. Joux F, Jeffrey WH, Lebaron P, Mitchell DL. Marine bacterial isolates display diverse response to UVB radiation. *Appl Environ Microbiol* 1999; 65: 3820-7.
16. Karl DM. Microbial processes in the Southern oceans. En: Friedmann EI (Ed), *Antarctic Microbiology*. Wiley-Liss, New York, 1992, pp. 1-63.
17. Karentz D, Lutze LH. Evaluation of biologically harmful ultraviolet radiation in Antarctica with a biological dosimeter designed for aquatic environments. *Limnol Oceanogr* 1990; 35: 549-61.
18. Kirk JTO. Light and photosynthesis in aquatic ecosystems. Cambridge University Press, 1983, 401 pp.
19. Neale PJ, Helbling EW, Zagarese H. Modulation of UVR exposure and effects by vertical mixing and advection. En: Helbling EW, Zagarese H (Ed), *UV effects in aquatic organisms and ecosystems*. Royal Society of Chemistry, Cambridge, 2003; 576 pp.
20. Schloss IR, Ferreyra GA. Primary production, light and vertical mixing in Potter Cove, a shallow bay in the maritime Antarctic. *Polar Biol* 2001; 25: 41-8.
21. Schloss IR, Ferreyra GA, Ruiz-Pino D. Phytoplankton biomass in Antarctic shelf zones: a conceptual model based on Potter Cove, King George Island. *J Mar Syst* 2002; 36: 129-43.
22. Sommaruga R, Oberleiter A, Herndl GJ, Psenner R. Inhibitory effect of solar radiation on thymidine and leucine incorporation by freshwater and marine bacterioplankton. *Appl Environ Microbiol* 1997; 63: 4178-84.
23. Staehelin J, Harris NRP, Appenzeller C, Ebenhard J. Ozone trends: a review. *Reviews of Geophysics* 2001; 39: 231-90.
24. Varela L. Hydrology of Matias and Potter creeks. *Ber Polarforsch* 1998; 299: 33-9.
25. Vincent WF, Neale PJ. Mechanisms of UV damage to aquatic organisms. En: de Mora SJ, Demers S, Vernet M, editors, *The Effects of UV Radiation in the Marine Environment*. Cambridge: Cambridge University Press 2000, p. 149-56.
26. Wilhelm SW, Jeffrey WH, Suttle CA, Mitchell DL. Estimation of biologically damaging UV levels in marine surface waters with DNA and viral dosimeters. *Photochem Photobiol* 2002; 76: 268-73.