CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

La desinfección es vital en el tratamiento del agua potable, una desinfección sencilla y económica facilitaría el proceso en cualquier región, que no cuente con sistemas de desinfección adecuados. La desinfección solar es un desinfectante, el cual en esta tesis se probó su efectividad para inactivar microorganismos. Para ello se seleccionaron las esporas de *B. subtilis* como organismos indicadores, debido a su relativamente "alta" resistencia a otros procesos de desinfección química y radiación ultravioleta. Los resultados obtenidos en este estudio corroboraron la baja sensibilidad de estos microorganismos a la desinfección solar y permitieron identificar algunas limitaciones de este procedimiento de desinfección.

Los resultados obtenidos de los experimentos con radiación solar demostraron que la tasa de inactivación de las esporas de *B. subtilis* es muy elevada en los primeros 90-180 minutos de exposición, en los cuales se observó de forma consistente un 40% de inactivación del microorganismo. No obstante, después de esa fase inicial de rápido decaimiento en viabilidad, la tasa de inactivación disminuyó considerablemente. Esta disminución en la efectividad de la radiación solar como desinfectante se debió muy probablemente al decaimiento natural de la intensidad solar experimentada por los microorganismos hacia el final de los ensayos de inactivación.

Se observó que las condiciones climatológicas juegan un papel muy importante en la eficiencia de la desinfección solar. Como se demostró experimentalmente, en ocasiones se pueden necesitar tiempos de exposición tan "pequeños" como 30 min para inactivar 90% de las esporas de *B. subtilis* con energía solar, pero en otras se pueden requerir tiempos de contacto de hasta 8 horas para lograr el mismo nivel de inactivación. Por obvias razones la intensidad de la radiación solar en un día despejado es mucho mayor que la obtenida en un día medio-nublado o nublado, y por ello la eficiencia del proceso de desinfección solar depende en buena medida de las condiciones climáticas.

A pesar de no contar con un piranómetro para medir directamente la intensidad de la radiación solar utilizada en los experimentos de desinfección, los experimentos de inactivación conducidos con *E. coli* permitieron estimar de manera satisfactoria las dosis de radiación aplicadas durante las dos primeras horas de exposición. En primer lugar, se observó que *E. coli* es significativamente más vulnerable a la radiación solar que las esporas de *B. subtilis*. El rango de tiempos requeridos para inactivar 90% de estos microorganismos fue de 9-60 minutos, lo cual demuestra también la importancia de las condiciones climatológicas en la inactivación de *E. coli*. Los resultados de la biodosimetría conducida con *E. coli* revelaron que las dosis potencialmente aplicadas para la inactivación de *B. subtilis* fueron del orden de 720 kJ/m^2 para inactivar 90% de las esporas. El interés por expresar los resultados de desinfección solar en términos de dosis (y no en términos de tiempos de exposición únicamente) se centra en la posible comparación de estos resultados con los que se obtendrán en estudios próximos. Recordando que la dosis de radiación solar se calcula como el producto de la intensidad

de radiación y el tiempo de exposición utilizada ($I \times t$, en kJ/m^2), se puede esperar que las dosis requeridas para lograr un cierto nivel de inactivación de las esporas y otros microorganismos de interés en agua potable sean únicas e independientes de la intensidad de radiación. Para validar dicho supuesto se recomienda elaborar ensayos de inactivación solar que utilicen un rango muy variado de intensidades para posteriormente expresar los resultados en función de la dosis aplicada y verificar el supuesto. Seria muy recomendable que dichos experimentos se condujeran con la ayuda de un piranómetro que permitiera registrar la magnitud y variaciones de la intensidad solar a lo largo del ensayo. De esta manera, se facilitaría enormemente la estimación de las dosis utilizadas para inactivación.

Otra parte importante de este estudio fue la evaluación de la resistencia de las esporas de *B. subtilis* utilizadas en este estudio. Varios estudios han reportado la gran variación en resistencia a la desinfección con que pueden producirse las esporas en el laboratorio. Pequeñas variaciones en la composición del medio de cultivo o de los tiempos utilizados en la preparación de las esporas pueden afectar de manera determinante su capacidad para resistir la acción de un desinfectante. Por tal razón, fue necesario caracterizar la cinética de inactivación de las esporas de *B. subtilis* con cloro libre. Al comparar los resultados obtenidos con los reportados por otros autores se pudo confirmar la alta resistencia de las esporas producidas en el laboratorio. Se encontró que la dosis requerida para inactivar 90% de las esporas con este desinfectante fue de 580 mg-min/L a pH 7.85 y temperatura ambiente (~22°C). Estos resultados aseguran que el

microorganismo seleccionado para los ensayos con radiación solar era efectivamente resistente y no uno “debilitado” en el proceso de preparación.

El trabajo realizado en esta tesis permite afirmar que la desinfección solar tiene capacidad para inactivar microorganismos resistentes y de interés en el tratamiento del agua potable. No obstante, su eficiencia como desinfectante puede considerarse como baja, al requerir tiempos de exposición sumamente largos para lograr niveles importantes de inactivación de ciertos microorganismos. Por tal motivo, su aplicación como desinfectante estaría limitada a procesos que no involucraran flujos continuos y, por lo tanto, de poca capacidad de generación de agua potable.

Sin embargo, existen algunas variantes que podrían incrementar la eficiencia de la radiación solar y que ayudarían a proyectar este proceso como una solución económica para realizar desinfección de agua a mayor escala. Una de estas variantes seria el magnificar la intensidad de la radiación solar utilizando no solo los mecanismos de reflexión ya incluso investigados, sino mediante el uso de lentes que permitieran aumentar dicha intensidad. Según expertos en el tema, la intensidad de la radiación solar podria aumentarse hasta 40 veces, reduciendo con ello los tiempos de exposición requeridos en una proporción similar. El diseño adecuado de reactores que permitieran dicha amplificación de la intensidad permitiría reducir los tiempos de exposición de horas a minutos, incrementando así de forma significativa la eficiencia del proceso.

Otra alternativa que potencialmente podría mejorar la eficiencia de la radiación solar como desinfectante seria la de la fotocatálisis. Los fotones captados por el agua irradiada han sido utilizados por algunos investigadores para oxidar algunos contaminantes persistentes en el agua potable tales como pesticidas y herbicidas. Para ello, se requiere de algún compuesto o catalizador, el cual se sumerge o mezcla en el flujo de agua y permite la oxidación del contaminante de interés. Un proceso similar podría utilizarse con fines de desinfección.