

CAPÍTULO 4

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Estimación de la intensidad de la radiación solar

Como se explico en el capítulo numero tres, la variación de intensidad estuvo presente en el experimento de radiación solar sola y se tuvo como limitante el mal funcionamiento del piranómetro, por lo que fue necesario realizar la biosimetría utilizando los resultados obtenidos por Guisar (2006). La variación de intensidad estuvo presente en ambos casos, para el caso de Guisar la intensidad más alta registrada fue de 1165 W/m², con esta intensidad, se realizó la curva de calibración de la prueba de radiación solar de este proyecto, obteniendo una intensidad de 792 W/m², la variación de intensidad de radiación muestra que la inactivación de esporas es menor a lo esperado en un tiempo similar al de Guisar (2006).

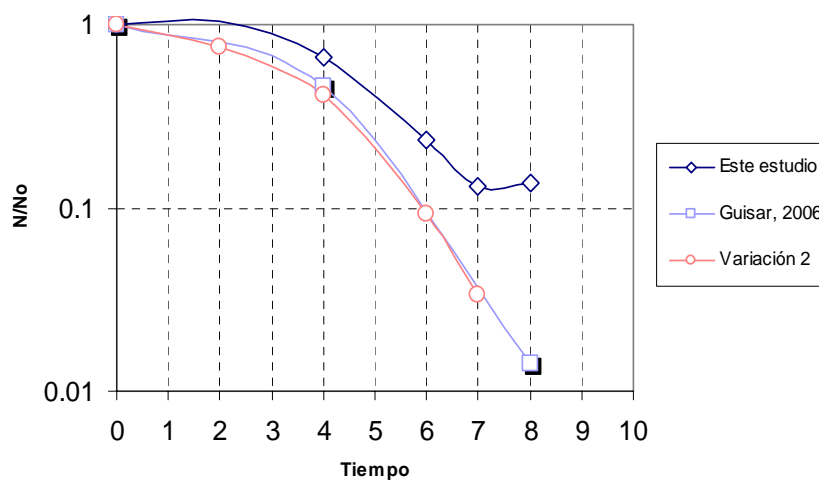


Figura 4.1 Biosimetría para determinar intensidad

4.2 Inactivación de *Bacillus subtilis* con radiación solar

Como puede observarse en la figura 4.2 la cinética de los resultados de inactivación de esporas de *Bacillus subtilis* con radiación solar sola esta constituida por una fase inicial “lenta” que dura ~4 horas, durante la cual no hay inactivación significativa del microorganismo. Esta fase inicial es secundada por una fase relativamente más rápida en la que las esporas son más susceptibles a la radiación solar. En la figura 4.2 puede observarse además que se requiere entre 7-8 horas de exposición con radiación solar intensa para inactivar 90.0% de las esporas contenidas en una muestra.

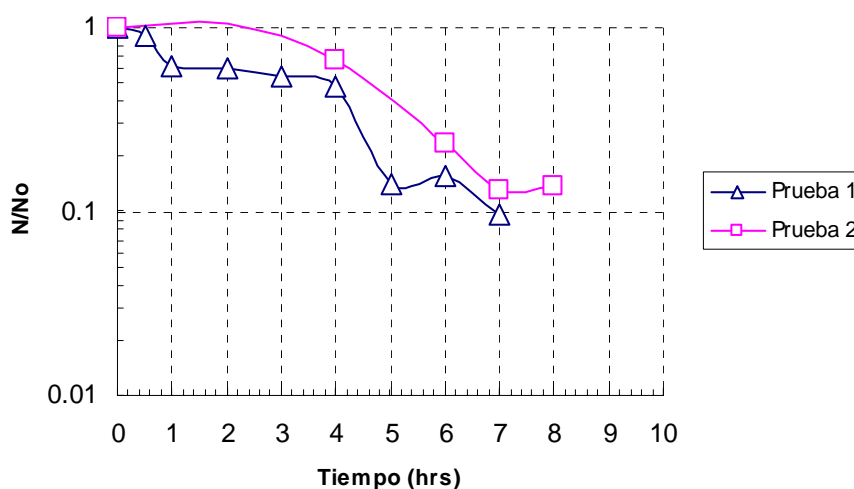


Figura 4.2 Inactivación de *Bacillus subtilis* con radiación solar sola.

Estudios previos de Guisar (2006) y Uscanga (2006) habían reportado cinéticas de inactivación similares a las reportadas en este estudio. A pesar de que los tres estudios fueron elaborados con la misma concentración de esporas, pueden observarse diferencias entre ellos (ver figura 4.3).

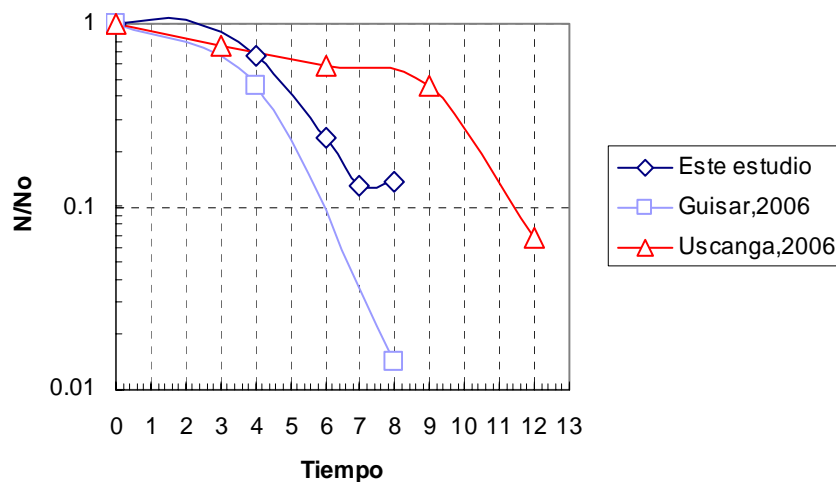


Figura 4.3 Comparativa de inactivación de *Bacillus subtilis* de estudios anteriores con la de este proyecto.

Varios autores ha reportado que aún pequeños variaciones en la composición o dosificación del medio cultivo empleado para crecer esporas de *Bacillus* pueden resultar en diferentes tasas de reproducción del mismo. Es probable que las variaciones observadas en la figura 4.3 correspondan al menos en parte a este fenómeno. Adicionalmente es importante resaltar el hecho que los tres estudios utilizaron el mismo simulador solar aunque con distinta edad en la lámpara de xenón. Es posible que la lámpara vea afectada su flujo fotónico al aumentar su uso o edad y con ello se afecte la intensidad de la radiación emitida.

4.3 Inactivación de *Bacillus subtilis* por fotocátalisis solar

En la figura 4.4 se ilustran los resultados obtenidos en los experimentos de desinfección con fotocátalisis solar. Conforme a los resultados observados para desinfección solar sencilla, se estimó que los tiempos de exposición requeridos ante la presencia de catalizador

serían más cortos. Se realizó la prueba número uno con periodos de contacto de hasta 6 horas, pero como se puede observar en la figuras 4.4, este lapso de tiempo sólo es suficiente para inactivar el 60% de las concertación inicial de esporas y es necesario extender los tiempos de exposición para lograr mayores eficiencias de inactivación.

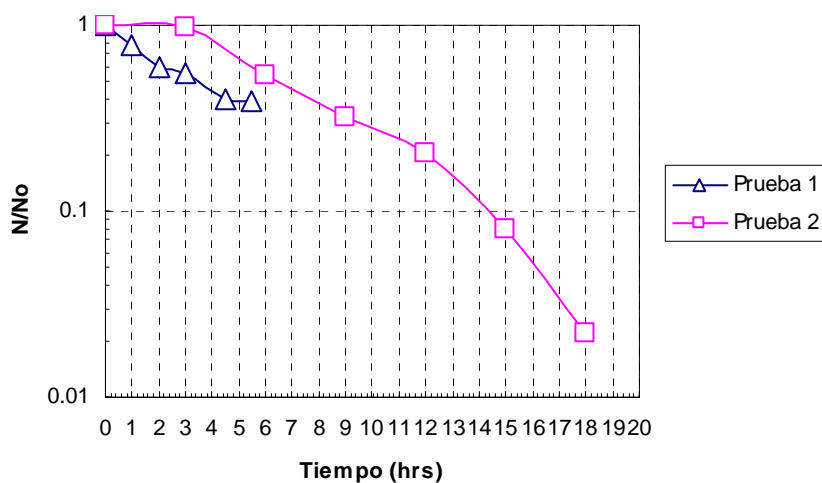


Figura 4.4 Inactivación de *Bacillus subtilis* con dióxido de titanio inmovilizado.

De este modo se amplió el tiempo de contacto hasta 18 horas, esperando inactivar totalmente al microorganismo. Los resultados obtenidos para la prueba numero dos muestra que la exposición a la radiación solar catalizada con TiO_2 inmovilizado durante 18 horas son suficientes para inactivar el 98% de esporas *Bacillus subtilis*. Es importante resaltar la similitud que guarda la cinética de resultados de inactivación obtenida en estos experimentos con la descrita previamente para radiación solar sencilla.

De nueva cuenta se observa la presencia de una fase inicial “lenta” seguida de una fase más “rápida”. Algunos investigadores han sugerido que la fase “lenta” podría concebirse como un “esfuerzo de cedencia” el cual debe aplicarse al microorganismo ante la aplicación de un desinfectante antes de iniciar su proceso real de inactivación. Los mismos investigadores han idealizado que esta resistencia inicial presentada por la espora podría concebirse simplemente como la dificultad que tiene el desinfectante para permear a través de las capas exteriores que protegen al microorganismo y que para el caso de *Bacillus subtilis* fueron esquematizadas en la figura 2.6.

La figura 4.2 con los resultados presentados en la figura 4.4 puede observarse que lejos de acelerar el proceso de inactivación, el uso de TiO_2 inmovilizado parece perjudicarlo, contrario a las 8 horas de exposición estimadas para inactivar esporas con radiación solar sencilla, el dióxido de titanio inmovilizado requiere 10 horas adicionales para alcanzar el 90% de inactivación. Es necesario realizar un mayor número de pruebas experimentales para comprobar que los resultados son completamente reproducibles y que las tendencias aquí presentadas en la figura 4.4 son definitivas. Varios factores podrían alterar o influir los resultados experimentales, como el control adecuado en la intensidad de la radiación solar simulada, así como la variación inducida en la refracción de la propia radiación por la placa sumergida.

En la figura 4.5 se muestra una comparativa de las pruebas numero uno y numero dos de este proyecto con los resultados de Uscanga(2006), el cual empleó diferentes dosificaciones de TiO_2 para preparar suspensiones y colocar en ellas esporas de *Bacillus subtilis*. Es importante mencionar que las cinéticas de inactivación reportadas por Uscanga(2006) para

fotocatálisis heterogénea guarda una similitud considerable. En base a ellos y a la observación hecha por Uscanga en cuanto al efecto benéfico que tiene la disminución gradual en la concentración con TiO_2 es altamente probable que si se realizan más experimentos con TiO_2 inmovilizado, pero con concentraciones menores, estos permitan observar tasas de inactivación de esporas mucho más elevadas. Las placas de acero inoxidable aquí utilizadas fueron preparadas en la Universidad de Cincinnati y amablemente donadas por el Dr. Dionysios D. Dionysiou.

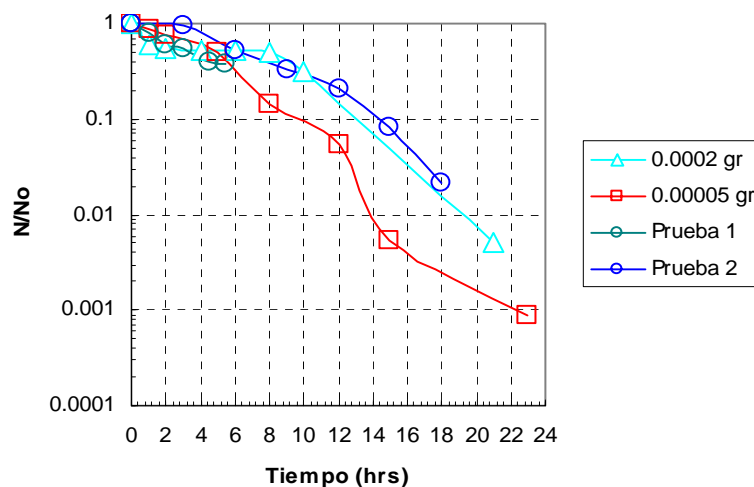


Figura 4.5 Comparativa de inactivación de *Bacillus Subtilis* con dióxido de titanio inmovilizado y lo realizado por Uscanga(2006).

4.4 Inactivación de *Bacillus subtilis* por cloro libre

La Figura 4.6 se muestran los resultados obtenidos para las pruebas de desinfección con cloro libre a pH 6.0 y T=30° C. Similar a los resultados obtenidos con radiación solar y fotocatalisis heterogénea, los obtenidos con cloro libre reportan cinética de inactivación

compuesta por una fase “lenta” seguida de una más “rápida”. En este caso, la fase lenta tiene una duración de $C_{xt} \sim 400$ mg-min/L, lo cual significa que se requieren 4 mg/l de cloro libre, aplicadas durante 100 minutos para rebasar el “esfuerzo de cadencia” necesario para iniciar el proceso de inactivación de la población de esporas utilizadas. Los resultados reportados son comparables a los obtenidos por Uscanga (2006).

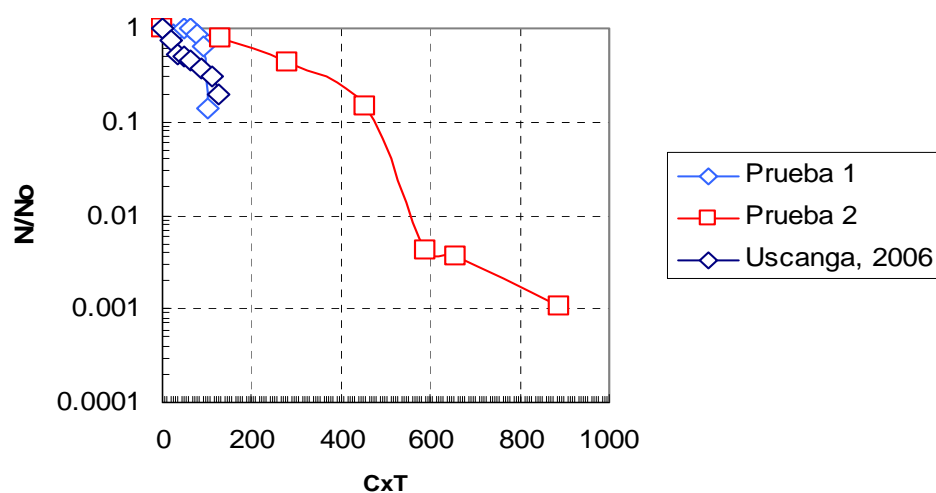


Figura 4.6 Inactivación de Esporas *Bacillus Subtilis* a temperatura (30° C) y Ph 6