



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA

FACULTAD DE INGENIERÍA

CINÉTICA DE INACTIVACIÓN Y EVALUACIÓN DEL
RECRECIMIENTO DE BACTERIAS DE LA FAMILIA
ENTEROBACTERIACEAE Y VIBRIONACEAE EN
AGUA DESINFECTADA CON RADIACIÓN SOLAR

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE

MAESTRO EN INGENIERÍA
(AMBIENTAL)

P R E S E N T A:

I.I.Q. SANDRA VÁZQUEZ VILLANUEVA

TUTOR:

M. EN C. JUANA E. CORTÉS MUÑOZ



JIUTEPEC, MORELOS

2009



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

AGRADECIMIENTOS

- A la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) por facilitarme los recursos necesarios para el adecuado desempeño en mis estudios.
- Al Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA), en particular a la Subcoordinación de Potabilización, por las instalaciones y equipo requeridos para el desarrollo de la tesis.
- Agradezco especialmente a mi Directora de tesis: M. en .C. Juana E. Cortés Muñoz, por brindarme sus conocimientos, su atención y apoyo en todo momento.
- A los miembros del Jurado, por sus valiosas aportaciones para la redacción de la tesis.
- A Miguel Ángel Córdova R., por apoyarme como amigo y Jefe para concluir este trabajo.
- A mi Esposo y mis hijos, por su comprensión y por cederme su tiempo. Los Amo.

INDICE GENERAL

ÍNDICE DE FIGURAS	iv
ÍNDICE DE TABLAS	vii
RESUMEN	1
INTRODUCCIÓN	4
OBJETIVOS	6
1 CALIDAD MICROBIOLÓGICA DEL AGUA	7
1.1 Situación global	7
1.2 Situación en México	9
2 ENFERMEDADES DE TRANSMISIÓN HÍDRICA.....	17
3 DESINFECCIÓN	22
3.1 Tipos de desinfectantes	23
4 PRINCIPALES ALTERNATIVAS DE DESINFECCIÓN EN ZONAS RURALES	26
4.1 Comparación de los métodos de desinfección domiciliarios	26
5 DESINFECCIÓN MEDIANTE RADIACIÓN SOLAR	28
5.1 Radiación solar	29
5.1.1 Efecto de la radiación solar sobre los microorganismos.....	33
5.2 Temperatura	35
5.2.1 Efecto de la temperatura en los microorganismos	36
5.3 Concentrador solar.....	36
5.3.1 Superficies reflejantes.....	38
5.4 Características de los contenedores.....	39
5.5 Parámetros fisicoquímicos del agua de importancia en la desinfección solar	41
5.6 Cinética de desinfección solar	42
5.7 Estudios de campo	44
6. METODOLOGÍA	46
6.1 Preparación de cepas para las pruebas	47
6.2 Procedimientos de cuantificación de bacterias.....	47
6.3 Descripción del concentrador solar del IMTA.....	51
6.4 Cinéticas de inactivación microbiana	53
6.4.1 Cálculo de las cinéticas de inactivación	53
6.4.2 Evaluación del efecto de la radiación y temperatura	55
6.5 Evaluación del recrecimiento de bacterias después de la desinfección solar	55
6.6 Pruebas en campo.....	56
6.6.1 Descripción de la comunidad “Los Dormidos”	56
6.6.2 Determinación de la calidad bacteriológica del agua de abastecimiento.....	58
6.6.3 Cinética de inactivación con agua de la fuente de abastecimiento de la comunidad.....	58
6.6.4 Evaluación del efecto de la temperatura y la radiación.....	59
6.6.5 Evaluación del recrecimiento en agua desinfectada	

con radiación solar en la comunidad	59
6.6.6 Pruebas de desinfección solar realizadas por la población.....	59
7. RESULTADOS.....	60
7.1 Cinética de inactivación	60
7.1.1 Coliformes totales y <i>E.coli</i>	61
7.1.2 Cinética de inactivación para <i>Salmonella</i>	68
7.1.3 Cinética de inactivación para <i>Enterococcus faecalis</i>	73
7.1.4 Cinética de inactivación para <i>Vibrio cholerae O1 Inaba</i>	76
7.1.5 Efecto de la radiación y temperatura	80
7.2 Recrecimiento de bacterias heterótrofas, coliformes totales, <i>Escherichia coli</i> , enterobacterias, <i>Salmonella arizonae</i> y <i>Vibrio cholerae O1 Inaba</i>	83
7.3 Resultados de la desinfección solar en “Los Dormidos”	88
7.3.1 Calidad bacteriológicas del agua en la fuente de abastecimiento	88
7.3.2 Cinéticas de inactivación y evaluación del recrecimiento en la comunidad.....	89
7.3.3 Pruebas de recrecimiento en la comunidad	93
7.3.4 Resultados de las pruebas de desinfección solar con la población	96
8. CONCLUSIONES.....	100
9. RECOMENDACIONES.....	102
BIBLIOGRAFÍA.....	103
ANEXO 1. Datos para las curvas de inactivación	

INDICE DE FIGURAS

Figura	Página
1. Distribución de inversiones por Programa y dependencia 2006.....	10
2. Cobertura de agua potable en localidades urbanas y rurales	11
3. Distribución de agua suministrada y desinfectada para consumo humano por entidad federativa, 2006	12
4. Número de localidades con alto y muy alto grado de marginación por entidad .	13
5. Evolución de las tasas de mortalidad por infecciones intestinales	15
6. Tasa de mortalidad por diarrea infecciosa en niños menores de cinco años. México 1980-2005.....	21
7. Regiones de la radiación electromagnética	30
8. Dímeros de timina.....	34
9. Concentrador con espejos inclinados, colector horizontal.....	38
10. Pérdida de transmitancia por daño mecánico.....	41
11. Pérdida de transmitancia por fotoproductos	41
12. Cinética de inactivación de la desinfección por UV	43
13. Curva de inactivación “hombro-log lineal”	45
14. Tiras reactivas con las respuestas típicas de enterobacterias.	48
15. Concentrador diseñado por el IMTA	51
16. Concentrador solar para comunidades rurales.....	52
17. Reflectancia y transmitancia de los materiales utilizados	52
18. Pantalla de resultados GInaFiT	54
19. Localización de la Comunidad de estudio, Los Dormidos.....	56
20. Imagen satelital de la comunidad Los Dormidos.....	57
21. Fuente de abastecimiento de la comunidad Los Dormidos	58
22. Concentrador solar para ocho botellas	59
23. Radiación registrada para coliformes totales	61
24. Cinética de inactivación para coliformes totales en PET transparente, T=52°C.....	61
25. Cinética de inactivación para coliformes totales en PET transparente, T=38°C.....	62
26. Cinética de inactivación para coliformes totales en PET ½ negro, T=72°C.....	62

27. Cinética de inactivación para coliformes totales en PET ½ negro, T=52°C ...	63
28. Dosis requerida para inactivar el 99.9% de coliformes totales	64
29. Cinética de inactivación para <i>E. coli</i> en PET transparente, T=52°C.....	65
30. Cinética de inactivación para <i>E. coli</i> en PET transparente, T=38°C.....	65
31. Cinética de inactivación para <i>E.coli</i> en PET ½ negro, T=72°C	66
32. Cinética de inactivación para <i>E.coli</i> en PET ½ negro, T=52°C	66
33. Dosis de radiación para inactivar al 99.9% de <i>E. coli</i>	67
34. Radiación registrada para las pruebas con <i>Salmonella</i>	69
35. Cinética de inactivación para <i>S. arizonae</i> , PET transparente, 47°C.....	70
36. Cinética de inactivación para <i>S. arizonae</i> , PET ½ negro, 66°C.....	70
37. Cinética de inactivación para <i>S. typhi</i> , PET transparente, 40°C.	71
38. Cinética de inactivación para <i>S. typhi</i> , PET ½ negro, 51°C.	71
39. Dosis de radiación para inactivar al 99.9% de <i>S. arizonae</i> y <i>S. typhi</i>	72
40. Radiación registrada para las pruebas con <i>Enterococos faecalis</i>	74
41. Cinética de inactivación para <i>E. faecalis</i> , PET transparente, T=60°C.	74
42. Cinética de inactivación para <i>E. faecalis</i> , PET ½ negro, T=76°C.....	75
43. Dosis de radiación para inactivar al 99.9% de <i>Enterococcus faecalis</i>	75
44. Radiación registrada para las pruebas con <i>Vibrio cholerae O1 Inaba</i>	76
45. Cinética de inactivación para <i>V. cholerae</i> O1 Inaba. PET transparente, T=45°C.....	77
46. Cinética de inactivación para <i>V. cholerae</i> O1 Inaba. PET transparente, T=30°C.....	77
47. Cinética de inactivación para <i>V. cholerae</i> O1 Inaba. PET ½ negro, T=64°C. ...	78
48. Cinética de inactivación para <i>V. cholerae</i> O1 Inaba. PET ½ negro, T=43°C. ...	78
49. Dosis de radiación para inactivar al 99.9% de <i>Vibrio cholerae O1 Inaba</i>	79
50. Efecto de la radiación, temperatura y radiación+temperatura para coliformes totales, radiación promedio 940 W/m ²	81
51. Efecto de la radiación, temperatura y radiación+temperatura para <i>Salmonella arizonae</i> , radiación promedio 936 W/m ²	82
52. Efecto de la radiación, temperatura y radiación+temperatura para <i>Yersinia spp</i> , <i>Erwinella americana</i> y <i>Pasteurella spp</i>	82
53. Radiación solar durante la prueba de recrecimiento.....	83
54. Recrecimiento de coliformes totales (2939 W.h/m ²).....	84

55. Recrecimiento de <i>Escherichia coli</i> (2939 W.h/m ²).	84
56. Recrecimiento de bacterias mesofilicas aerobias (2939 W.h/m ²).....	84
57. Recrecimiento de <i>Vibrio cholerae</i> O1 Inaba en agar TCBS (2939 W.h/m ²)....	85
58. Recrecimiento de <i>Vibrio cholerae</i> O1 Inaba en agar soya tripticaseína (2939 W.h/m ²)	85
59. Recrecimiento de <i>Salmonella arizonae</i> en agar soya tripticaseína (2939 W.h/m ²)	86
60. Reparación de ADN mediante fotoactivación y procesos enzimáticos	88
61. Radiación registrada para las pruebas en los Dormidos.	89
62. Cinética de inactivación, Los Dormidos, coliformes totales, PET transparente, 44°C.	90
63. Cinética de inactivación, Los Dormidos, coliformes totales, PET ½ negro, 55°C.	90
64. Cinética de inactivación, Los Dormidos, <i>E. coli</i> , PET transparente, 44°C.....	91
65. Cinética de inactivación, Los Dormidos, <i>E. coli</i> , PET ½ negro, 55°C.....	91
66. Dosis de radiación para inactivar al 99.9% de coliformes totales y <i>E. coli</i>	92
67. Efecto de la radiación, temperatura y radiación+temperatura para coliformes totales, radiación promedio 723 W/m ² . Los Dormidos	93
68. Recrecimiento de coliformes totales en agua de la fuente de Los Dormidos (2117 W/m ²).	93
69. Recrecimiento de <i>Escherichia coli</i> en agua de la fuente de Los Dormidos. (2117 W/m ²).....	94
70. Recrecimiento de <i>coliformes totales</i> en agua de la fuente de Los Dormidos (3272 W/m ²).	94
71. Recrecimiento de <i>coliformes totales</i> en agua de la fuente de Los Dormidos (3272 W/m ²).	95
72. Resultados del primer muestreo en la comunidad.....	97
73. Resultados del segundo muestreo en la comunidad	97
74. Resultados del tercer muestreo en la comunidad	98
75. Resultados del cuarto muestreo en la comunidad	98
76. Resultados del quinto muestreo en la comunidad.	99
77. Resultados del sexto muestreo en la comunidad	99

INDICE DE TABLAS

Tabla	Página
1. Veinte principales causas de enfermedad en menores de 1 año. 2005.....	13
2. Veinte principales causas de enfermedad en el grupo de 1-4 años. 2005	14
3. Principales causas de mortalidad en menores de 5 años. 2005	14
4. Casos de enfermedades infecciosas del aparato digestivo 2002-2006	15
5. Patógenos transmitidos a través del agua de consumo	18
6. Tipos de desinfectantes y sus características	24
7. Comparación de las alternativas de desinfección en viviendas.....	27
8. Costos para métodos de desinfección domiciliarios	28
9. Clasificación de las radiaciones electromagnéticas	30
10. Efectos atmosféricos sobre las radiaciones electromagnéticas	31
11. Absorción de energía solar a través de diversos materiales.....	40
12. Composición de los medios de cultivo para detectar diferentes bacterias mesofilicas aerobias y enterobacterias	51
13. Registro de datos para cada microorganismo de prueba.....	53
14. Características de las pruebas de recrecimiento.....	55
15. Indicadores sociodemográficos para los Dormidos.....	57
16. Condiciones controladas para las pruebas de recrecimiento en el agua de la comunidad.....	59
17. Resultados k y $F_{99.9\%}$ para coliformes totales.....	63
18. Resultados de k y $F_{99.9\%}$ para <i>E. coli</i>	67
19. Resultados de k y $F_{99.9\%}$ para <i>Salmonella typhi</i> y <i>Salmonella arizonae</i>	72
20. Resultados de k y $F_{99.9\%}$ para <i>Enterococos faecalis</i>	75
21. Resultados de k y $F_{99.9\%}$ para <i>Vibrio cholerae O1 Inaba</i>	79
22. Especies detectadas en la fuente de abastecimiento de la comunidad	88
23. Valores de k y $F_{99.9\%}$ para el agua de abastecimiento en la comunidad.....	92

RESUMEN

A nivel mundial, se estima que 88% de las enfermedades diarreicas son producto de un abastecimiento de agua insalubre y de un saneamiento e higiene deficientes. Mejorar la calidad del agua de bebida en el punto de uso puede reducir entre un 35 y un 39% los episodios de diarrea (WHO, 2004). En México, como resultado de la intervención para desinfectar el agua mediante el Programa Agua Limpia, junto con las campañas de vacunación y las Semanas Nacionales de Salud, se disminuyó en 93% la tasa de mortalidad por diarrea en menores de cinco años en el periodo 1980-2005 (Sepúlveda, 2007). Estos resultados demuestran que es necesario seguir investigando y evaluando las tecnologías de desinfección que permitan a la población tener acceso a agua potable segura.

En este trabajo, se evaluó la desinfección solar utilizando un concentrador horizontal con paneles laterales inclinados recubiertos con papel aluminio, desarrollado en el IMTA (Martin *et al.*, 1999). Para establecer las condiciones que permitieran utilizar de manera segura el agua desinfectada con este dispositivo, se planteó determinar las cinéticas de inactivación de bacterias de la familia Enterobacteriaceae y Vibrionaceae así como evaluar la recuperación de estos microorganismos en el agua almacenada. Las cinéticas de inactivación se determinaron con diferentes condiciones de prueba para analizar la contribución de la radiación y la temperatura. También se evaluó si los coliformes totales y *Escherichia coli* son adecuados como indicadores de contaminación entérica para monitorear la desinfección solar.

Las bacterias de prueba fueron *coliformes totales*, *Escherichia coli*, *Salmonella arizonae*, *Salmonella typhi*, *Enterococcus faecalis* y *Vibrio cholerae O1 Inaba*. Los experimentos se realizaron bajo diferentes condiciones de radiación, es decir, en días soleados y nublados, en tres tipos de botella: transparente, la mitad pintada de negro y negra; la concentración de microorganismos fue del orden de 10^5 - 10^6 NMP/100 ml.

En el laboratorio, se corroboró la viabilidad de los microorganismos mediante el uso de diferentes substratos para su detección y de esta manera verificar la capacidad de recuperación que tienen algunas especies bacterianas y que utilizando solo medios selectivos no es posible determinar; paralelamente se probaron métodos de análisis diferentes, a fin de asegurar y verificar los resultados

Posteriormente, esta tecnología se probó en campo. La comunidad elegida, Los Dormidos, se encuentra en Tlaquiltenango, Morelos, presenta un alto índice de marginación y está constituida por 14 familias que carecen de los servicios básicos de agua y saneamiento; el agua para consumo la obtienen de un manantial que presenta contaminación fecal. El trabajo de campo consistió en construir concentradores solares con las mujeres, determinar la calidad bacteriológica del agua de la fuente de abastecimiento, muestreos del agua desinfectada y pruebas de decaimiento y recrecimiento de bacterias coliformes y *Escherichia coli* en el sitio.

La radiación registrada durante las pruebas en todos los casos fue mayor a 500 W/m^2 , con estos datos y el tiempo de exposición, se obtuvieron las cinéticas de inactivación para los microorganismos de prueba a excepción de *Salmonella*

arizonae que no mostró susceptibilidad a la radiación ni a la temperatura. Las cinéticas de inactivación siguieron un comportamiento de primer orden. La menor dosis de radiación ($F_{99.9\%}$) requerida fue de 300 W.h/m² y se obtuvo con *Vibrio cholerae* O1 Inaba en botella transparente, que correspondió a una radiación promedio de 658 W/m² y 30 minutos de exposición; la dosis más alta, la requirieron los coliformes totales en botella transparente con $F_{99.9\%} = 3000$ W.h/m², la radiación promedio para esta prueba fue de 505.19 W/m², el tiempo de exposición fue de 5 h.

La eficiencia de inactivación se incrementó con la temperatura en el caso de los coliformes y *Salmonella typhi*, reduciendo el tiempo de exposición a la mitad, por el contrario, en el caso de *Enterococcus* y *Vibrio cholerae* se observó que el efecto principal se debe a la radiación solar y que el incremento de la temperatura en la botella ½ negra no mejora el proceso. La dosis de radiación para la inactivación total de los microorganismos presentó el siguiente orden: Coliformes totales > *Escherichia coli* > *Salmonella typhi* > *Enterococcus* > *Vibrio cholerae*.

Los resultados de laboratorio mostraron que con una dosis acumulada de radiación de aproximadamente 3,241 (W.h/m²), se logra inactivar niveles de 10⁵ coliformes totales/100 ml, 10⁴ *Escherichia coli*/100 ml y cuatro unidades logarítmicas de bacterias heterótrofas. Con estos resultados, se puede concluir que el tiempo mínimo de exposición para inactivar microorganismos fecales debe ser de al menos tres horas en un día soleado.

En cuanto al recrecimiento, se confirmó que las radiaciones son las que ejercen la mayor influencia ya que no se recuperaron bacterias en el medio de cultivo, en un periodo de tiempo de 72 horas en las botellas transparentes, expuestas a niveles de radiación de 3000 W.h/m² o más. El recrecimiento se presentó en las condiciones menos favorables, es decir, cuando la radiación fue menor a 2000 W.h/m², que corresponde a día nublado.

En la comunidad, las condiciones para las pruebas de inactivación fueron de día soleado con radiación promedio de 723 W/m² y una concentración de 2.9 x 10³ NMP/100 ml de coliformes totales en el agua cruda. Se obtuvo la cinética de inactivación de primer orden como en las pruebas de laboratorio, con dosis de inactivación de 1368 W.h/m² para coliformes totales y 1200 W.h/m² para *Escherichia coli*. Las pruebas de recrecimiento fueron negativas cuando el agua se expuso a una radiación acumulada de 3000 W.h/m². Los resultados del agua desinfectada por las familias variaron ampliamente, pero en general fueron satisfactorios, *Escherichia coli* se inactiva en 17 de 21 muestras.

En conclusión, la desinfección solar sigue una cinética de inactivación de primer orden cuyas ecuaciones representan las condiciones de radiación específicas de la prueba y de la concentración de microorganismos utilizada. El efecto principal se debe a la radiación y con el incremento de temperatura se observa efecto sinérgico con los coliformes totales y *Salmonella typhi* sólo cuando la temperatura es mayor a 55°C. El grupo coliforme utilizado es adecuado como indicador de contaminación, ya que presentó la mayor resistencia a la desinfección solar a excepción de *Salmonella arizonae*. Con esta técnica es posible inactivar niveles de 10⁵ de

coliformes totales/100 ml, 10^4 de *Escherichia coli* /100 ml, 10^5 de *Vibrio Cholerae O1 Inaba*, 10^4 de *Salmonella typhi* y 10^3 de *Enterococcus*.

Se concluye que la metodología es técnicamente factible en comunidades rurales y su factibilidad social está limitada por los mismos factores que limitan a otras técnicas de desinfección: usos y costumbres de la comunidad. La metodología no es capaz de abatir totalmente la incidencia de diarreas bacterianas, pero si puede disminuirla sensiblemente.

Las recomendaciones se orientan al manejo que la gente debe dar al agua una vez desinfectada: exponer las botellas a la radiación solar durante todo el día; no almacenar el agua por más de 24 Horas.

INTRODUCCIÓN

La contaminación microbiológica es el factor de riesgo más crítico en la calidad del agua potable, con un alto potencial para la difusión de enfermedades de origen hídrico, como se establece en la Modificación a la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994, "El abastecimiento de agua para uso y consumo humano con calidad adecuada es fundamental para prevenir y evitar la transmisión de enfermedades infecciosas y parasitarias...". La Norma propone la desinfección para la destrucción de organismos patógenos por medio de la aplicación de productos químicos o procesos físicos para cumplir con los límites máximos permisibles para el contenido de organismos que deberá ser ausencia o no detectables para coliformes totales y *E. coli* o coliformes fecales u organismos termotolerantes.

Estas medidas para asegurar y preservar la calidad microbiológica del agua, se deben a que las enfermedades transmitidas por el agua o por medios afines Figuran entre las causas principales de enfermedad y muerte en el mundo y contribuyen a la elevada mortalidad infantil, la reducida esperanza de vida y la mala calidad de vida, como lo demuestran las estadísticas internacionales y nacionales.

De acuerdo a la OMS/UNICEF (2007), aproximadamente 1.8 millones de personas mueren cada año por enfermedades relacionadas con la higiene básica, como la diarrea y 1.5 millones son niños menores de cinco años. En los países en vías de desarrollo, la diarrea es la segunda causa de muerte en la población infantil antecedida solo por las enfermedades respiratorias. En México, las desigualdades que prevalecen entre los diferentes estratos poblacionales, explican en gran medida el hecho de que, en algunas regiones del país, sobre todo rurales, persistan las enfermedades propias del subdesarrollo como son las infecciosas o transmisibles y aunque la mortalidad por diarrea disminuyó de 27.8 por 100 mil niños menores de cinco años en 2001 a 14.6 por 100 mil niños en 2007, sigue prevaleciendo principalmente en ambientes pobres e insalubres.

Los agentes patógenos involucrados con la transmisión por esta vía son las bacterias, virus y protozoos, que pueden causar enfermedades con diferentes niveles de gravedad, desde una gastroenteritis simple, hasta serios y a veces fatales cuadros de diarrea, disentería, hepatitis o fiebre tifoidea. Estas enfermedades pueden prevenirse si se adoptan medidas eficaces para evitar la transmisión. Se ha comprobado que las intervenciones en higiene, saneamiento y abastecimiento de agua permiten controlar esta carga de enfermedad (OMS/UNICEF, 2007).

Para esto, se dispone de varios métodos de tratamiento físico y químico para mejorar la calidad microbiológica del agua. Muchos de estos métodos se han probado e implementado en diferentes niveles en países desarrollados y en desarrollo (Acra, 1990; Meierhofer and Wegelin, 2002; Solsona, 2003). Algunos se han probado en laboratorio y luego se implementaron en campo a fin de evaluar su capacidad de producir agua potable de calidad microbiológica aceptable y de mantener esa calidad durante su almacenamiento y uso. No obstante, no se ha investigado ni documentado apropiadamente la capacidad de algunos métodos para eliminar o inactivar una amplia gama de agentes patógenos conocidos transmitidos por el agua.

La OMS (2007), reconoce que junto con la filtración en filtros de cerámica y la cloración, la desinfección solar en botellas de plástico a través de la acción combinada de radiación ultravioleta y calor, son las tecnologías más prometedoras y accesibles para el tratamiento domiciliario del agua. La radiación solar se ha aplicado variando el tipo de contenedor y la superficie reflejante; se han probado como contenedores botellas de plástico y vidrio, así como bolsas de plástico. Como superficie reflejante se ha utilizado lámina galvanizada, recipientes cóncavos recubiertos de papel aluminio ó simplemente colocando los contenedores al sol.

En México, para atender la problemática de la población que no cuenta con agua segura para beber, se desarrolló en el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA) un concentrador solar horizontal, con paneles laterales inclinados recubiertos con papel aluminio (Martin, 1999) que utiliza como contenedores botellas de PET (Polietilén Tereftalato) que pueden ser transparentes ó con la mitad pintada de negro.

A este dispositivo se le realizaron pruebas para determinar la eficiencia en la inactivación de bacterias indicadoras y *Vibrio cholerae*. Se utilizó el efluente de la planta de tratamiento de aguas residuales del IMTA, cuyo contenido de coliformes totales es de alrededor de 10^5 NMP/100 ml, agua de la llave inoculada con aproximadamente 10^6 Unidades Formadoras de Placa Viral/100 ml y agua de la llave con 10^3 Unidades Formadoras de Colonia de *Vibrio cholerae*/100 ml (UFC/100 ml). Los resultados fueron alentadores, ya que no se detectaron organismos viables en el agua tratada (Martín *et al.*, 1999), utilizando substratos únicos para el cultivo en el laboratorio

Por lo tanto, con la finalidad de evaluar la calidad microbiológica del agua y establecer las condiciones seguras para el uso de esta tecnología, era necesario evaluar la eficacia de este dispositivo bajo diferentes condiciones de radiación solar y determinar la posibilidad de recuperación de los microorganismos como consecuencia del almacenamiento del agua una vez que ésta ha sido desinfectada, dado que se sabe que la sensibilidad y resistencia de los microorganismos a cualquier desinfectante, físico o químico, depende en gran medida del tipo y cepa microbiana que se trate, y que además los microorganismos cuentan con estrategias adaptativas y mecanismos de reparación de daño al material genético

Es por esto que, en este trabajo se pretende ampliar la gama de organismos de prueba y corroborar su viabilidad mediante el uso de diferentes substratos para su detección en el laboratorio; determinar el tiempo mínimo de inactivación a través de la obtención de las cinéticas de inactivación para cada organismo y condición de radiación; verificar la capacidad de recrecimiento que tienen las bacterias con diferentes tiempos de almacenamiento y corroborar los resultados de laboratorio en una comunidad rural.

Con esta información, se tendrá documentado el desempeño, ventajas y desventajas de esta tecnología para el tratamiento domiciliario del agua que permitan mejorar la calidad microbiológica del agua y reducir las enfermedades diarreicas.

OBJETIVOS

GENERAL

Determinar las cinéticas de inactivación microbiana para *coliformes totales*, *Escherichia coli*, *Salmonella* spp, *Vibrio Cholerae*, y *Enterococcus faecalis* y determinar el efecto del almacenamiento en la recuperación de estos organismos en agua desinfectada con radiación solar.

PARTICULARES

- Determinar los tiempos y cinéticas de inactivación con diferentes organismos de prueba.
- Analizar la contribución de la radiación y la temperatura.
- Evaluar si el actual sistema de indicadores de calidad bacteriológica del agua es adecuado para monitorear la desinfección solar.
- Evaluar la recuperación de las bacterias del agua desinfectada almacenada.
- Establecer la eficiencia de la desinfección solar con el agua de la fuente de abastecimiento de la comunidad de Los Dormidos, Tlaquiltenango, Mor.
- Establecer las limitaciones de la desinfección solar con el fin de dar recomendaciones para su uso en comunidades rurales, sin riesgo de infecciones intestinales.

1. CALIDAD MICROBIOLÓGICA DEL AGUA

La calidad microbiológica del agua para consumo humano o agua potable, es un factor determinante en la transmisión de enfermedades infecciosas y que tiene por tanto graves consecuencias a la salud. Evidentemente, los principales afectados son aquellos que no disponen de acceso a fuentes de agua segura, ni de instalaciones sanitarias adecuadas, como lo demuestran las estadísticas mundiales y locales que se presentan a continuación.

1.1 Situación global

La Organización Mundial de la Salud, OMS (WHO, por sus siglas en inglés) en el Reporte Mundial de Salud 2007, subraya que la necesidad de proporcionar tratamiento tanto para el agua de bebida como para la higiene sigue siendo hoy un enorme reto en los países en desarrollo. Actualmente, 1 100 millones de personas carecen de acceso a agua salubre y 2 600 millones carecen de acceso a un saneamiento adecuado. El resultado es que más de 4 500 niños menores de cinco años mueren cada día de enfermedades que pueden prevenirse fácilmente, como la diarrea.

Según datos publicados en 2004 por la OMS y la Organización de las Naciones Unidas para la Infancia (UNICEF, por sus siglas en inglés), en 2002 la cobertura global indicaba que, de cada 10 personas, sólo cinco cuentan con agua entubada, tres la obtienen de fuentes tales como manantiales protegidos, pozos e hidrantes públicos; dos no tienen acceso al agua y la obtienen de fuentes no seguras como ríos, lagos, manantiales y pozos no protegidos o vendedores de agua.

La forma en que las personas obtienen el agua para consumo tiene un impacto directo en su salud y en el estatus económico del hogar. Los hogares que solo utilizan fuentes de agua remotas y sin protección, ponen en peligro su salud por utilizar agua contaminada (WHO, 2006). Además, la cantidad de agua recolectada generalmente es pequeña para asegurar la higiene aún si se bañan y lavan la ropa fuera de la vivienda. Cuando utilizan fuentes mejoradas de agua, tales como manantiales y pozos protegidos localizados a una distancia razonable, se disminuye el impacto a la salud ya que la calidad microbiológica del agua puede ser aceptable al momento de su recolección; sin embargo, la higiene puede estar todavía comprometida por que el agua se puede contaminar con patógenos de origen fecal durante el transporte, almacenamiento y manejo de ésta.

Durante décadas se ha fomentado el acceso universal al agua segura como un paso esencial para reducir los riesgos de enfermedades diarreicas y muertes. La combinación de agua potable segura e instalaciones sanitarias higiénicas son una precondition para la salud y el éxito en la lucha contra la pobreza, el hambre, la mortalidad infantil y la inequidad de género. Los países que adoptaron los Objetivos de Desarrollo del Milenio (ODM), se comprometieron a reducir a la mitad la proporción de personas sin acceso a agua potable segura y saneamiento básico, de acuerdo a las estadísticas de la WHO/UNICEF (2004), el 83% de la población mundial cuenta con agua potable.

Sin embargo, de la población total en países en desarrollo que tiene acceso al agua potable, el 92 % pertenece a población urbana y 70% a la población rural. Esto significa que por cada persona sin agua potable mejorada en zonas urbanas, hay seis personas sin acceso en zonas rurales.

Esto influye invariablemente en el nivel de salud y de vida de la población: incidencia de infecciones de origen hídrico (cólera, diarreas, parasitosis) y enfermedades crónico-degenerativas asociadas a la exposición de contaminantes químicos, por ejemplo, el hidroarsenicismo.

Por lo tanto, el mejoramiento en los servicios de agua potable y saneamiento trae consigo beneficios que se consideran invaluable para el desarrollo social y económico, en tanto que las carencias y deficiencia en estos servicios tienen un alto costo en salud, para lo cual basta ver las siguientes estadísticas mundiales (WHO, 2004):

- Se estima que anualmente mueren 1.8 millones de personas debido a enfermedades diarreicas, un 90% de esas personas son niños menores de cinco años, principalmente procedentes de países en desarrollo. La mejora del abastecimiento de agua reduce entre un 6% y un 21% la morbilidad por diarrea; las medidas de higiene (lavarse las manos) en un 45%. La mejora de la calidad del agua de bebida mediante el tratamiento del agua doméstica, puede reducir en un 35% a un 39% los episodios de diarrea.
- 133 millones de personas padecen graves infecciones debidas a helmintos intestinales, que a menudo tienen consecuencias graves como alteraciones cognitivas, disentería importante o anemia. Esas enfermedades causan unas 9400 defunciones cada año. El acceso a los servicios de agua potable y saneamiento así como el mejoramiento de las prácticas de higiene pueden reducir la morbilidad por ascariasis en un 29% y la morbilidad por anquilostomiasis en un 4%.
- Se estima que 500 millones de personas corren el riesgo de padecer tracoma, 146 millones corren el peligro de padecer ceguera y cerca de 6 millones de personas padecen alguna discapacidad visual a causa del tracoma. Esta enfermedad guarda estrecha relación con el hecho de no lavarse la cara, a menudo debido a la falta de servicios cercanos de abastecimiento de agua potable y se comprueba que abasteciendo agua en cantidades suficientes, se reduce la mediana de la tasa de infección en un 27%.
- El arsénico en el agua de consumo humano, es un problema prioritario en salud pública para varios países del mundo.
- El cólera ha sido un problema en todo el mundo, que se previene abasteciendo de agua bacteriológicamente segura a la población, la disposición adecuada de excretas, y buenas conductas de higiene. En América, la epidemia se inició en Perú en 1990 y se expandió a 16 países, en México el primer caso confirmado se presentó en junio de 1991, después de un siglo de ausencia de este padecimiento. En el continente se reportaron un total de 378 488 casos en 1991.

-
- En la actualidad, el cólera es endémico en algunos países y en México se encuentra controlado de acuerdo con las estadísticas oficiales, lo cual no significa que se haya logrado abatir la incidencia de infecciones intestinales, principalmente entre la población infantil, ya que estos padecimientos se encuentran entre las cinco principales causas de muerte en menores de cinco años.

1.2 Situación en México

En México, la calidad del agua para consumo humano es también un problema. Si bien, existen contaminantes tóxicos que pueden ocasionar efectos puntuales muy graves en la salud, la contaminación microbiológica del agua para consumo humano es muy preocupante ya que ataca a un porcentaje elevado de la población, generalmente en los sectores más pobres, que no están en condiciones de abastecerse por medios alternativos.

Aunque actualmente existen planes y programas para atender la problemática de estas zonas y en lo que respecta al agua se tienen líneas y acciones específicas, la cobertura de agua sigue siendo baja y todavía más crítico es el aspecto de la calidad. A continuación se describen las acciones que se llevan a cabo y posteriormente los resultados de éstas y como influyen en la salud de la población rural, principalmente.

En el Programa Nacional Hidráulico (PNH 2001-2006) se establecieron seis objetivos generales, entre los que destaca el relativo a “Fomentar la ampliación de la cobertura y la calidad de los servicios de agua potable, alcantarillado y saneamiento”, a fin de elevar el nivel de vida de la población nacional, disminuyendo la presencia de enfermedades que afectan el entorno social, económico y ambiental de los habitantes.

En lo que respecta al agua potable, se definieron las siguientes líneas estratégicas: 1) Sustener el incremento de las coberturas y fomentar la mejora en la calidad de los servicios de agua potable, alcantarillado y saneamiento y 2) Propiciar la atención al rezago en la cobertura y calidad de los servicios de agua potable, alcantarillado y saneamiento básico en zonas rurales.

Para ampliar la cobertura de los servicios de agua potable y alcantarillado, la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), en coordinación con los gobiernos estatal y municipal, realizó inversiones a través de diferentes programas, mismos que se rigen por Reglas de Operación, elaboradas en cumplimiento a las disposiciones emitidas en el Presupuesto de Egresos de la Federación para cada ejercicio fiscal, o por sus propios lineamientos. Los programas que brindan apoyo a las zonas rurales son:

- Programa para la Sostenibilidad de los Servicios de Agua Potable y Saneamiento en Comunidades Rurales (PROSSAPYS). De 1996 a 1998 denominado Programa de Agua Potable y Saneamiento en Zonas Rurales, financiado parcialmente con recursos federales a fondo perdido, provenientes de un crédito externo del Banco Interamericano de Desarrollo (BID).
- Programa de Agua Limpia (PAL). Se creó en 1991 para apoyar la desinfección del agua para consumo humano.

Existen además recursos por otras dependencias e instituciones que administran programas de apoyo al subsector hidráulico como la Secretaría de Desarrollo Social (SEDESOL), la Comisión Nacional para el Desarrollo de los Pueblos Indígenas (CDI), el Banco Nacional de Obras y Servicios Públicos (BANOBRAS) y organismos estatales. Las inversiones por programa y dependencia se distribuyeron en 2006 como se observa en la Figura 1.

Las inversiones de la SEDESOL comprenden el presupuesto de los siguientes programas: Hábitat, Desarrollo Local (Micro Regiones), Incentivos Estatales, Iniciativa Ciudadana 3X1, Empleo Temporal, 3X1 para migrantes y Jornaleros Agrícolas.

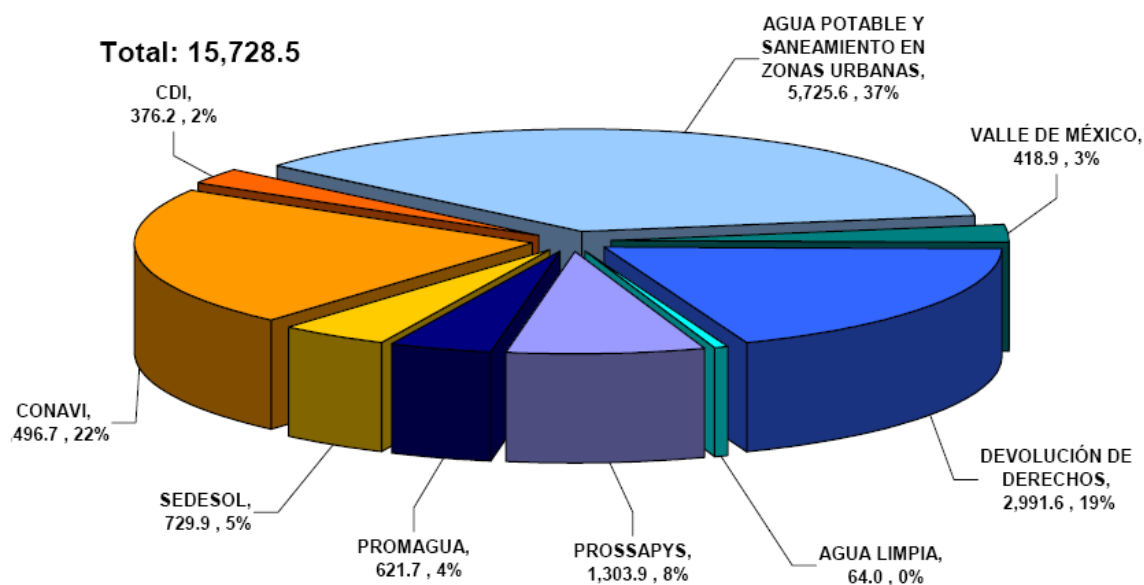


Figura 1. Distribución de inversiones (millones de pesos) por programa y dependencia 2006.

Fuente: CONAGUA, 2007.

Se observa que de la inversión total, se destinó sólo el 15% para atender a las comunidades rurales y que aunque la cobertura nacional de agua entubada, al 31 de diciembre de 2006, fue de 89.5%, 0.3% más que en el 2005, sólo se benefició a 1'000 000 habitantes adicionales, manteniendo en 10.4 millones el número de mexicanos que no cuentan con agua entubada en su vivienda.

De la población beneficiada (CONAGUA, 2007), 700 mil habitantes (95.1%) correspondieron a zonas urbanas (>2 500 habitantes), mientras que en las zonas rurales (<2 500 habitantes) se atendió tan solo a 300 mil habitantes, alcanzando una cobertura del 72.3%.

De acuerdo a estas cifras, 27.8% de la población equivalente a 6.7 millones de habitantes en zonas rurales siguen sin contar con este servicio y por lo tanto, están

en riesgo de contraer enfermedades relacionadas con el agua, disminuyendo con ello su calidad de vida (Figura 2).

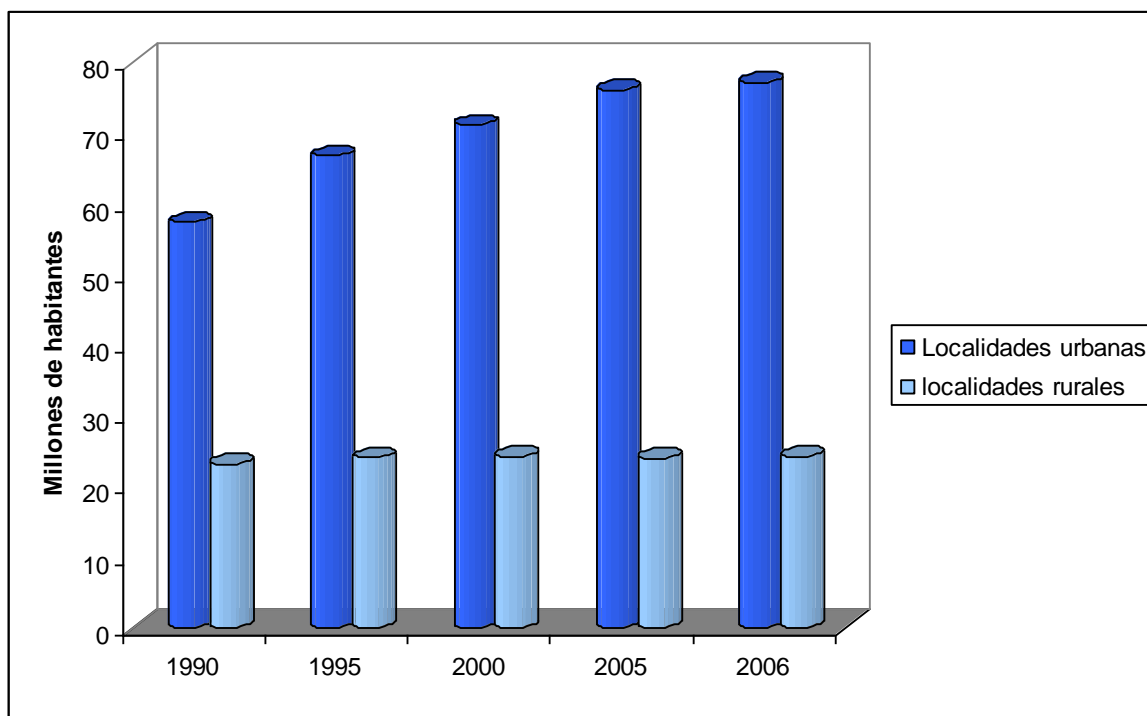


Figura 2. Cobertura de agua potable en localidades urbanas y rurales

Fuente: CONAGUA, 2007.

Lo anterior es el panorama en cuanto a la cobertura, en relación a la calidad del agua para consumo humano (desinfección), según las cifras reportadas por la aplicación del Programa Agua Limpia, el cual tiene la finalidad de asegurar a la población acceso a agua bacteriológicamente apta para consumo humano, al cierre del ejercicio 2006 reportó que se tiene una cobertura de agua desinfectada del 96.0%, esto significa que de 325.2 metros cúbicos por segundo de agua que se suministran a la población, urbana principalmente, en el ámbito nacional, se desinfectan 312.3 m³/s (Figura 3).

En localidades que no tienen cobertura de agua, principalmente en aquellas de alta y muy alta marginación, el Programa Agua Limpia brinda apoyo técnico y financiero, para que las autoridades realicen las acciones preventivas de desinfección y saneamiento básico. En estas localidades se llevaron a cabo 159 operativos de saneamiento básico, entre preventivos y emergentes que beneficiaron a cerca de 1.6 millones de habitantes de 609 localidades pertenecientes a 180 municipios. Se ejecutaron acciones como la cloración de 39,539 fuentes de abastecimiento, la desinfección de 562 sitios de alto riesgo; el encalamiento de 66,538 focos de infección y la distribución de 98,701 frascos de plata coloidal o cloro.

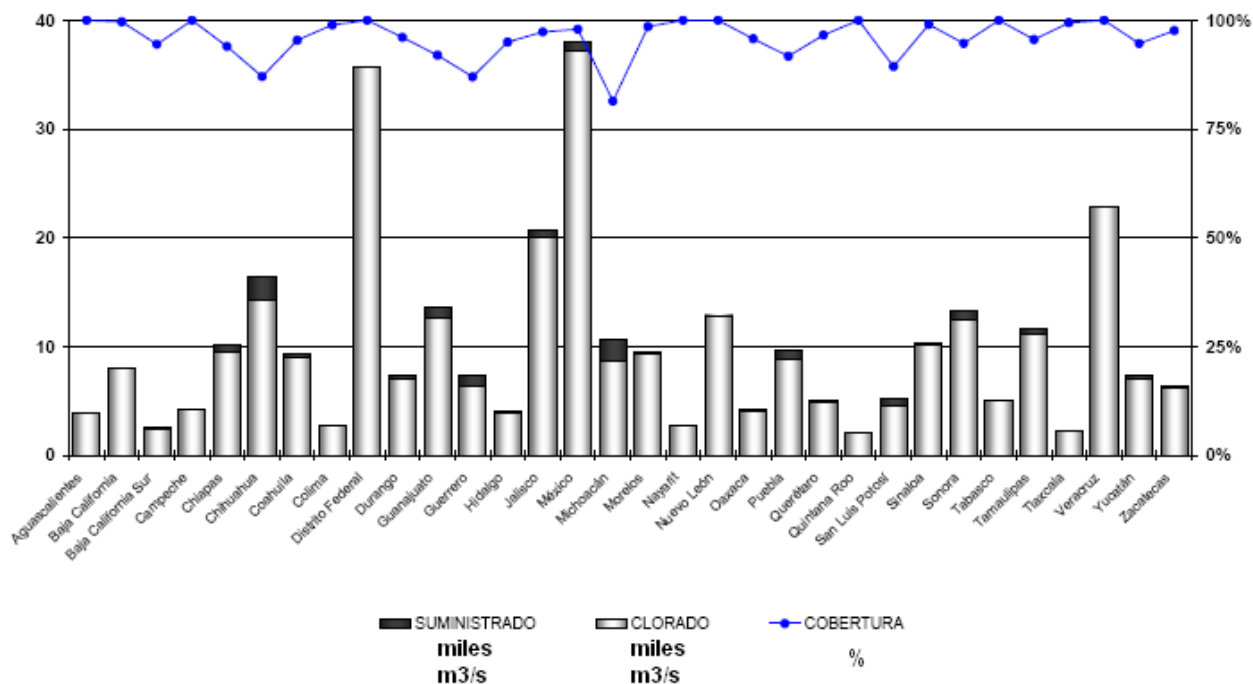


Figura 3. Distribución de agua suministrada y desinfectada para consumo humano por entidad federativa, 2006.

Fuente: CONAGUA, 2007.

Esto significa, que de los 6.7 millones de habitantes en zonas rurales que no disponen de agua en la vivienda, sólo el 23.8% recibió apoyo para acciones de desinfección de agua y saneamiento, quedando 5.1 millones de personas que consumen agua que no reúne los requisitos de calidad para prevenir que sea un vehículo transmisor de enfermedades infecciosas intestinales.

Como consecuencia, se tiene que en México prevalezcan las enfermedades diarreicas, principalmente en menores de cinco años, causadas por bacterias, virus y protozoarios, dispersadas a través de la ruta fecal – oral, el agua, alimentos y que se asocian a condiciones de saneamiento básico deficientes, así como a bajo nivel de educación y socioeconómico, es decir, a condiciones de marginación alta.

Así, las entidades con mayor índice de marginación entre las que se encuentran Veracruz, Chiapas, Oaxaca y Guerrero en el sur y sudeste del país (Figura 4), son por mucho las entidades con la mayor proporción de población residiendo en localidades con *alto* y *muy alto* grado de marginación, con 58, 55 y 47% de sus habitantes, respectivamente (CONAPO, 2005) y por tanto, son las que tienen mayor riesgo de padecer enfermedades infecciosas y parasitarias del aparato digestivo. Esto se demuestra por la prevalencia de estas enfermedades (tabla 1 y 2) como principales causas de morbi-mortalidad, ubicándolas entre las 20 primeras causas de morbilidad en menores de cinco años (SSA/DGE, 2007), y como primera causa de mortalidad en niños en edad preescolar (1-4 años) y la cuarta en menores de un año (tabla 3).

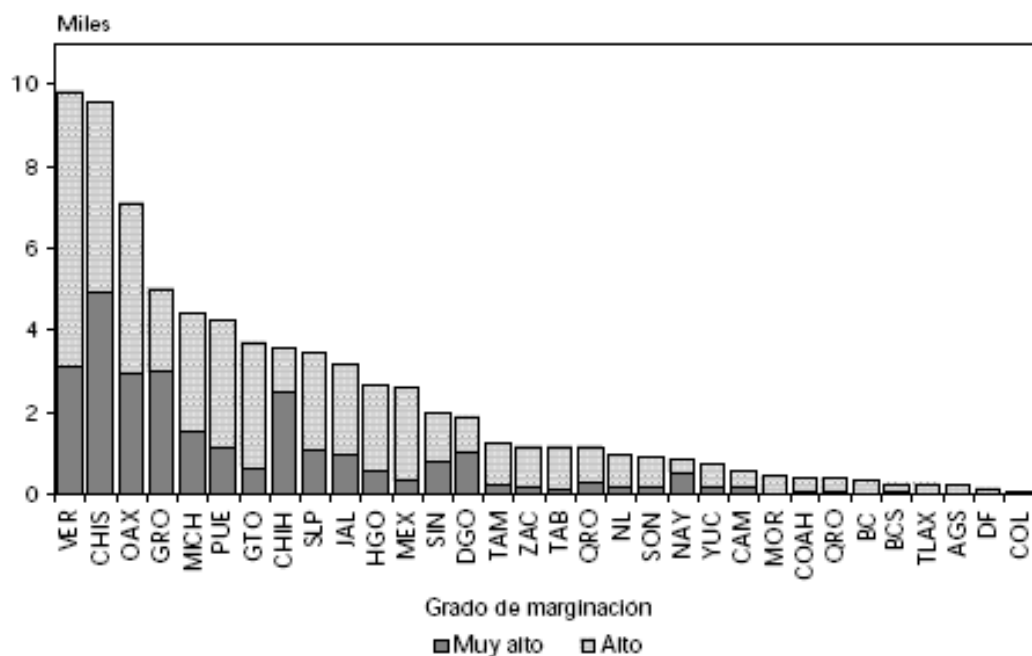


Figura 4. Número de localidades con alto y muy alto grado de marginación por entidad federativa.

Fuente: CONAPO, 2005.

Tabla 1. Veinte principales causas de enfermedad en menores de 1 año. 2005

Número	Padecimiento	Casos	Tasa*
1	Infecciones respiratorias agudas	2 707 857	1 401.02
2	Infecciones por otros organismos y las mal definidas	502 954	260.72
3	Neumonías y bronconeumonías	36 474	18.87
4	Amebiasis intestinal	35 383	18.31
5	Otitis media aguda	31 988	16.55
6	Infección de vías urinarias	28 851	14.93
7	Desnutrición leve	27 195	14.07
8	Conjuntivitis	23 595	12.21
9	Varicela	19 787	10.24
10	Otras helmintiasis	9 872	5.11
11	Asma y estado asmático	9 547	4.94
12	Otras infecciones intestinales debidas a protozoarios	8 796	4.55
13	Faringitis y amigdalitis estreptocócicas	7 475	3.87
14	Desnutrición moderada	5 994	3.10
15	Escabiosis	3 537	1.83
16	Quemaduras	2 881	1.49
17	Ascariasis	2 520	1.30
18	Intoxicación por picadura de alacrán	1 964	1.02
19	Desnutrición severa	1 888	0.98
20	Shigelosis	1 758	0.91
	Total 20 principales causas	3 470 316	1 795.50
	Otras causas	15 001	7.76
	Total global	3 485 317	1 803.26

* Por 1000 habitantes

Fuente: Anuarios de morbilidad/SSA/DGE, 2005

Tabla 2. Veinte principales causas de enfermedad en el grupo de 1-4 años. 2005

Número	Padecimiento	Casos	Tasa*
1	Infecciones respiratorias agudas	6 252 100	79 031.77
2	Infecciones por otros organismos y las mal definidas	1 127 919	14 257.84
3	Amebiasis intestinal	150 372	1 900.83
4	Infección de vías urinarias	144 512	1 826.75
5	Otitis media aguda	138 094	1 745.62
6	Desnutrición leve	97 293	1 229.86
7	Varicela	90 999	1 150.30
8	Otras helmintiasis	82 211	1 039.22
9	Asma y estado asmático	56 033	708.30
10	Ascariasis	44 610	563.91
11	Conjuntivitis	42 384	535.77
12	Neumonías y bronconeumonías	42 047	531.51
13	Otras infecciones intestinales debidas a protozoarios	31 299	395.65
14	Faringitis y amigdalitis estreptocócicas	25 501	279.86
15	Intoxicación por picadura de alacrán	22 139	279.86
16	Desnutrición moderada	20 346	257.19
17	Quemaduras	14 769	186.69
18	Mordeduras por perro	13 351	168.77
19	Escabiosis	13 109	165.71
20	Gingivitis y enfermedad periodontal	10 117	127.89
	Total 20 principales causas	8 419 205	106 425.79
	Otras causas	63 883	807.53
	Total global	8 483 088	107 233.33

* Por 100 000 habitantes

Fuente: Anuarios de morbilidad/SSA/DGE, 2005

Tabla 3. Principales causas de mortalidad en menores de 5 años. 2005

Menores de un año				
Orden	Padecimiento	Defunciones	Tasa*	%
	Total	32 590	1 663.6	100.0
1	Ciertas afecciones originadas en el periodo perinatal	16 448	839.6	50.5
2	Malformaciones congénitas del corazón	2 688	137.2	8.2
3	Infecciones respiratorias agudas bajas	2 490	127.1	7.6
4	Enfermedades infecciosas intestinales	1 200	61.3	3.7
5	Desnutrición calórica protéica	590	30.1	1.8
En edad preescolar (1-4 años)				
Orden	Padecimiento	Defunciones	Tasa*	%
	Total	6 450	81.5	100.0
1	Enfermedades infecciosas intestinales	628	7.9	9.7
2	Infecciones respiratorias agudas bajas	572	7.2	8.9
3	Malformaciones congénitas del corazón	480	6.1	7.4
4	Accidentes de tráfico de vehículo automotor	470	5.9	7.3
5	Ahogamiento y sumersión accidentales	319	4.0	4.9

* Por 100 000 habitantes

Fuente: Anuarios de mortalidad/SSA/DGE, 2005

Si bien en la última década se ha observado un descenso en las tasas de morbilidad y mortalidad por enfermedades infecciosas intestinales (Figura 5), esto se debe no sólo a mejoras en el acceso al agua y saneamiento, sino también a las intervenciones en salud como el avance en los programas de vacunación, control de

la salud, así como incremento en la educación. Las acciones realizadas reflejan un control adecuado del cólera al no presentarse casos en el 2006, manteniendo el índice en cero desde octubre de 2001. Además, se contribuyó a disminuir otras enfermedades infecciosas intestinales de transmisión hídrica, como se ilustra en la tabla 4.

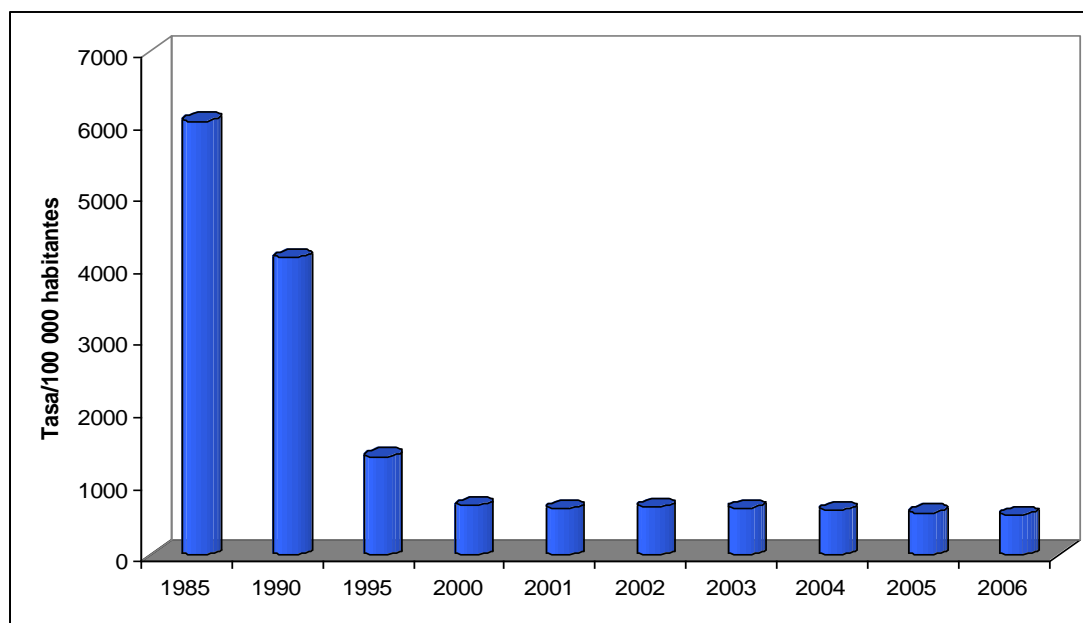


Figura 5. Evolución de las tasas de mortalidad por infecciones intestinales (1985-2006).

Fuente: Sexto Informe de Gobierno, 2006.

Tabla 4. Casos de enfermedades infecciosas del aparato digestivo 2002-2006.

Enfermedad	Número de casos por año					Diferencia
	2002	2003	2004	2005	2006	
Enfermedades Infecciosas Intestinales	6,831,630	6,191,011	5,951,869	5,912,952	5,501,691	-411,261
Shigelosis	31,473	27,704	22,321	19,441	15,805	-3,636
Fiebre Tifoidea	7,889	20,020	25,952	31,790	36,568	4,778
Paratifoidea y otras Salmonelosis	80,494	102,754	109,444	109,536	110,582	1,046
Infección intestinal, debida a Virus y otros organismos y las mal definidas	5,374,980	4,823,611	4,778,135	4,765,567	4,504,968	-260,599
Intoxicación alimentaria Bacteriana	21,659	36,057	39,947	40,599	37,269	-3,330

Fuente: CONAGUA, 2007.

Sin embargo, pese a este descenso de la mortalidad y morbilidad, persisten importantes diferencias entre entidades federativas, dividiéndolas en tres grupos: un grupo de estados con una probabilidad de muerte en menores de 1 año muy baja, conformado por el Distrito Federal y Nuevo León. Otro grupo con una probabilidad de muerte media, en el que se ubica la mayoría de las entidades federativas. Finalmente, tenemos un grupo de estados con una mortalidad infantil muy alta, en

el que se ubican Chiapas, Guerrero y Oaxaca, que presentan probabilidades de muerte en menores de 1 año superiores a 20 y 25 por 1,000 nacidos vivos en niñas y niños, respectivamente. Las diferencias entre grupos poblacionales más específicos son todavía mayores. En los 100 municipios con menor índice de desarrollo humano (IDH) la mortalidad infantil en 2005 fue de 32.5 contra 15.8 en los municipios con mayor IDH (CONAPO, 2005). Estas desigualdades son reflejo de un acceso diferencial a diversos bienes y servicios básicos. Se calcula que 79% de las muertes en menores de un año que se producen en el país son muertes evitables.

Esta información revela la necesidad de desarrollar estudios que resuelvan la problemática que representa la deficiente calidad bacteriológica del agua para consumo humano en zonas de alta marginación socioeconómica y de esta manera reducir la incidencia de enfermedades asociadas directa o indirectamente al consumo del agua. La falta de atención de los factores condicionantes de dicha situación, propiciará que en México y principalmente las zonas marginadas, continúen siendo, como hasta ahora, las que aporte el mayor número de enfermedades gastrointestinales en el país, con sus respectivas implicaciones en términos de retraso en el crecimiento y malnutrición de menores, mortalidad y costos de atención, tanto para los servicios de salud como para la población.

Las acciones que involucran al agua, deben dirigirse a proporcionar el recurso en términos de cantidad, calidad y continuidad a los diferentes usuarios. En general, se puede decir que en el país ha habido logros, dado que un mayor número de habitantes cuenta con servicio de agua entubada, sin embargo, la calidad sigue siendo una incógnita.

Por tanto, el control de la contaminación microbiológica del agua a través de la desinfección debe ser siempre un objetivo primordial (WHO, 2004, NOM-127) que involucra la adecuada selección del método óptimo de tratamiento. Para esto, es necesario conocer los tipos de enfermedades de transmisión hídrica y los microorganismos involucrados, por lo que se detallan en el siguiente capítulo.

2 ENFERMEDADES DE TRANSMISIÓN HÍDRICA

Agua potable se define como “el agua segura que se emplea para beber y todos los usos domésticos, incluida la higiene” (WHO/UNICEF, 2004), es por ello que la contaminación microbiológica del agua es el factor de riesgo más crítico en la calidad del agua potable, por su potencial para transmitir enfermedades. La carga de enfermedad derivada de la contaminación química de las fuentes de agua potable, es negligible cuando se compara con la ocasionada por organismos patógenos (Gray, 1999).

El término patógeno, se aplica a aquellos organismos que pueden causar enfermedades e incluye a bacterias, virus y protozoarios (Hurst, 1997); las enfermedades asociadas con el agua se clasifican de acuerdo al modo de transmisión y la forma de infección en cuatro categorías (OPS-CEPIS, 1997; Moe, 1997):

- Enfermedades de origen hídrico, cuando el patógeno se transmite por ingestión de agua contaminada.
- Enfermedades relacionadas con la higiene, incluye la transmisión de la enfermedad por la ruta fecal-oral o la transmisión persona-persona por la falta de una fuente adecuada de agua para la higiene, son típicas en áreas tropicales e incluye infecciones en el tracto intestinal, la piel y los ojos.
- Enfermedades de transmisión basada en el agua, cuando el patógeno desarrolla parte de su ciclo biológico en organismos acuáticos. Estas enfermedades las causan gusanos parásitos, y la severidad de la infección depende del número de gusanos infestando al huésped.
- Enfermedades relacionadas con el agua, la causan patógenos acarreados por insectos que actúan como vectores, los cuales pueden vivir cerca del agua, éstas enfermedades son severas y el control de los vectores es extremadamente difícil.

Las principales enfermedades transmitidas a la población son causadas por el consumo de agua contaminada con bacterias, virus y protozoarios. Los efectos a la salud humana varían en severidad, desde una gastroenteritis media hasta severos y algunas veces fatales casos de diarrea, disentería, hepatitis y fiebre tifoidea (WHO/UNICEF, 2004). En la tabla 5 se describen los patógenos causantes de estas enfermedades y se proporciona información sobre los efectos a la salud humana.

Tabla 5. Patógenos transmitidos a través del agua de consumo.

Patógeno	Enfermedad	Rutas de exposición	Fuente primaria	Periodo de incubación	Dosis infectiva media	Síntomas
Bacterias						
<i>Campylobacter jejuni</i>	Gastroenteritis	Alimentos	Heces humanas y de animales	3-5 días	10 ³	Gastroenteritis aguda, heces mucoides, posible presencia de sangre
<i>Escherichia coli</i> (serotipos)	Gastroenteritis	Alimentos, agua, persona-persona	Heces humanas y de animales	1-3 días	10 ⁸	Diarrea aguda, fiebre
<i>Salmonellae</i>	Gastroenteritis	Fecal – oral, agua y alimentos	Heces humanas de animales	8-48 horas		Dolor de cabeza, diarrea, vómito
<i>Salmonella typhi</i>	Fiebre tifoidea	Fecal – oral, agua y alimentos	Heces humanas y orina	7-28 días	10 ⁷	Fiebre, dolor de cabeza, náusea, vómito, dolor abdominal
<i>Shigellae</i>	Gastroenteritis	Fecal – oral, a través del contacto persona-persona, agua y alimentos	Heces humanas	1-7 días	10 ²	Posible disentería con fiebre
<i>Vibrio cholerae O1</i>	Cólera	Fecal –oral- agua y alimentos	Heces humanas	9-72 horas	10 ⁸	Diarrea acuosa profusa, vómito, deshidratación rápida
<i>Vibrio spp</i>	Gastroenteritis	Fecal –oral- agua y alimentos	Heces humanas	1- 5 días		Diarrea acuosa
<i>Yersinia enterocolitica</i>	Gastroenteritis	Fecal – oral, alimentos	Heces de animales y orina	2-7 días	10 ⁵	Dolor abdominal, diarrea mucoide, ocasionalmente con sangre, fiebre
Virus						
Adenovirus	Enteritis	Fecal – oral. Contacto persona – persona, dependiendo de la enfermedad puede ser también oral – oral, manos - ojos -	Heces humanas			Gastroenteritis, enfermedades respiratorias, conjuntivitis

Continúa...

...Continuación

Patógeno	Enfermedad	Rutas de exposición	Fuente primaria	Periodo de incubación	Dosis infectiva media	Síntomas
Coxsackievirus, ecovirus y poliovirus	Meningitis, miocarditis poliomelitis	Contacto persona – persona, fecal – oral, agua	Heces humanas	3 – 14 días	10 ³	Enfermedades febriles, respiratorias, meningitis, herpangina, diarrea, encefalitis, Enfermedad paralizante
Hepatitis A y E	Hepatitis	Agua, alimentos, contacto persona-persona	Heces humanas	13 - 65 días	10 ³	Fiebre, náusea, anorexia, dolor abdominal
Rotavirus A y B	Gastroenteritis	Fecal – oral, agua y alimentos	Heces humanas	1 -días	1 – 10 Unidades infecciosas	Gastroenteritis aguda con náusea y vómito
Calicivirus y astrovirus	Gastroenteritis	Fecal – oral, agua y alimentos	Heces humanas	1 – 4 días	1 – 10 Unidades infecciosas	Gastroenteritis aguda
Protozoarios						
<i>Giardia lamblia</i>	Giardiasis	Fecal – oral, agua y alimentos Contacto persona-persona	Heces humanas y de animales	5 – 25 días		Dolor abdominal, flatulencia, evacuaciones acuosas, con grasa
<i>Entamoeba histolytica</i>	Disentería	Fecal – oral, agua y alimentos Contacto persona-persona	Heces humanas	2-4 semanas	100 ooquistes	Dolor abdominal, diarrea mucoide o con sangre
<i>Cryptosporidium</i> spp	Disentería	Fecal – oral, agua y alimentos	Heces humanas y de animales	1-2 semanas	132 ooquistes	Diarrea acuosa profusa

Fuente: Adaptado de Dupont, 1992; Moe, 1997; WHO, 2006

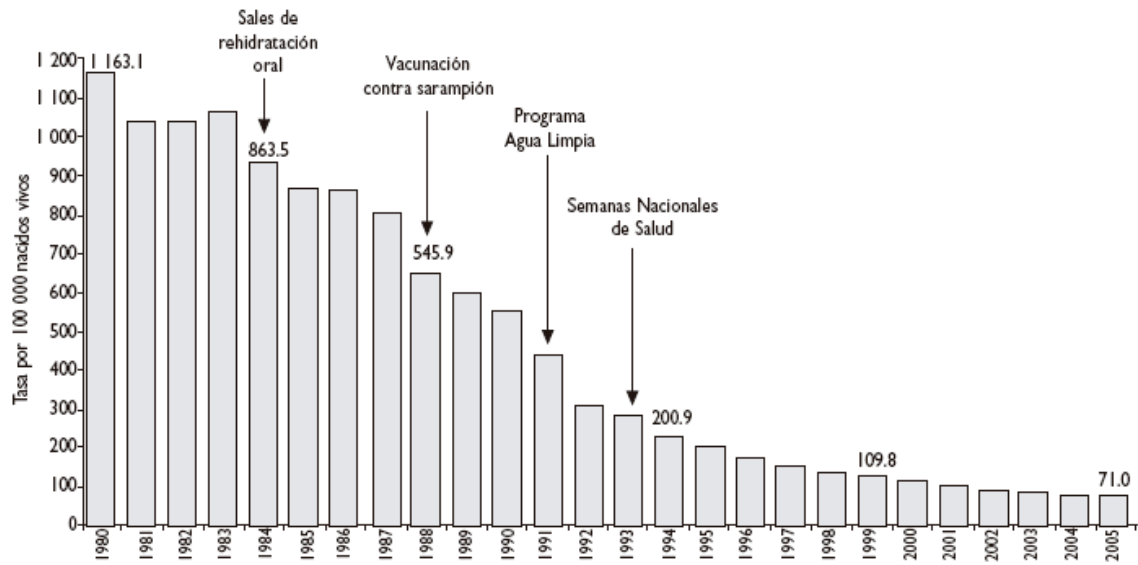
En conclusión, la falta de higiene y la carencia o el mal funcionamiento de los servicios sanitarios son algunas de las razones por las que la diarrea continúa representando un importante problema de salud en países en desarrollo.

Es evidente que mejorando la calidad microbiológica del agua es posible reducir la incidencia de enfermedades diarreicas y otras transmitidas por el agua, tanto en comunidades y viviendas de países desarrollados como en desarrollo. El nivel en el que la mejora de la calidad del agua reduce las enfermedades diarreicas, depende de varios factores ambientales específicos del lugar y de características demográficas que requieren de mayor investigación, caracterización y análisis. Se han observado reducciones del 6 a 90% (González, 2004; Sobsey, 2002; Witt *et al.*, 1993), dependiendo de la tecnología, la población expuesta y las condiciones locales.

En nuestro país se ha demostrado que la mejora de la calidad de agua por la aplicación del Programa Agua limpia (PAL) junto con otras intervenciones como la Vacunación Universal y las Semanas Nacionales de Salud (Sepúlveda *et al.*, 2007), disminuyeron la tasa de mortalidad por diarrea en 93% en niños menores de cinco años.

Como se puede observar en la Figura 6, en los quinquenios 1980-1985 y 1985-1990, la mortalidad por diarreas se ubicó como la primera causa de muerte y la tasa de mortalidad se mantuvo casi sin cambios en este periodo; en el siguiente quinquenio (1990-1995) se implementó el PAL y se observó una reducción del 61.1% en la tasa de mortalidad y la diarrea infecciosa ocupó el segundo lugar como causa de muerte. Para el año 2000 se reflejó el resultado de los diferentes programas al disminuir la tasa de mortalidad de 15.2 a 1.6 defunciones por cada 1 000 nacidos vivos, colocando esta causa de muerte en la posición cuatro. En el último quinquenio la tasa se mantuvo estable gracias a la continuidad que se ha dado a los diferentes programas. La implementación de acciones para el saneamiento para prevenir enfermedades se retomó e intensificó a partir del brote del cólera en 1991; entre las medidas se promovió el tratamiento del agua, tanto fuera de la casa mediante la cloración de las fuentes de abastecimiento, como dentro de los hogares mediante la cloración y la ebullición. Este estudio concluye que junto con las vacunas, el agua y el saneamiento han tenido un impacto positivo directo en la sobrevida en menores de cinco años.

Por tanto, se considera que es de gran importancia seguir desarrollando, mejorando, implementando, evaluando y comparando las tecnologías de desinfección que permitan a la población tener acceso a agua potable segura.



* Tasa por 100 000 nacidos vivos (estimado), CONAPO y datos preliminares SEED

Figura 6. Tasa de mortalidad por diarrea infecciosa en niños menores de cinco años. México 1980-2005.

Fuente: Sepúlveda, 2007

3 DESINFECCIÓN

La desinfección es el proceso de reducción del número de patógenos a niveles en los cuales el riesgo de infección es aceptable. Implica la exposición de microorganismos a condiciones físicas o químicas para destruirlos o detener su crecimiento. De hecho actúa con poblaciones de organismos y no con individuos, y esto tiene un efecto cinético en términos de mortalidad, en donde el criterio de muerte para un microorganismo es la pérdida irreversible de su capacidad de reproducción (Hooper, 1987).

La razón fundamental de la desinfección del agua es disminuir el riesgo de infección de las enfermedades transmitidas por el agua mediante la eliminación o inactivación de los diversos organismos patógenos que están o pueden estar presentes en la fuente de agua que las personas utilizan para satisfacer sus necesidades básicas, o que pueden haber conseguido acceso a ésta durante el proceso de transporte o almacenamiento (Witt, 1993). Cuando se carece de un abastecimiento de agua corriente idóneo y continuo en el hogar, la desinfección domiciliaria y el almacenamiento seguro constituyen las barreras más importantes contra las enfermedades transmitidas por el agua.

Por tanto, las propiedades que deben poseer los desinfectantes ideales, para cumplir adecuadamente su propósito en la protección de la salud pública son las siguientes:

- Deben destruir las clases y números de patógenos que se pueden introducir en el agua en un lapso práctico de tiempo, de una gama esperada en la temperatura del agua, y de las posibles fluctuaciones en composición, concentración y condición del agua sujeta a tratamiento.
- En las concentraciones requeridas no deben ser tóxicos para el hombre, animales, ni dar sabor desagradable al agua.
- Deben ser seguros y fáciles de almacenar, transportar, manipular y aplicar.
- Su concentración en el agua tratada debe ser determinable con facilidad, rapidez, y de preferencia, automáticamente.
- Debe persistir en el agua desinfectada con la concentración suficiente para proporcionar una protección residual razonable contra la posible recontaminación del agua antes de utilizarla.
- Deben ser aplicables a un costo razonable

Los mejores resultados generalmente se obtienen cuando el número inicial de microorganismos es bajo y cuando el agua está libre de posibles interferencias.

En cuanto a los factores que determinan la selección de un desinfectante, son principalmente la disponibilidad, costo, factores logísticos, costo de equipos y factor de seguridad (González, 2004; Sobsey, 2002; Witt, 1993). Sin embargo, los desinfectantes adicionados al agua pueden ser rechazados por la comunidad a causa de sus propiedades organolépticas desagradables. Muchos factores culturales entran en la decisión de donde o no desinfectar el agua a nivel de hogares.

3.1 TIPOS DE DESINFECTANTES

Los desinfectantes ejercen su acción dañando los lípidos y/o proteínas de la membrana citoplasmática semipermeable de los microorganismos, ocasionando la salida de materiales necesarios para sustentar la vida de la célula, o bien, pueden desnaturalizar las enzimas microbianas y otras proteínas, usualmente por ruptura de los enlaces hidrógeno-sulfuro que dan a estas moléculas su estructura funcional tridimensional, bloqueando el metabolismo (Hooper, 1987). Desinfectantes físicos como las radiaciones ultravioleta, causan mutaciones en el material genético, imposibilitando a los organismos para llevar a cabo sus funciones vitales (Solsona, 2003). En la tabla 6 se describen diferentes tipos de desinfección en alternativas específicas a nivel domiciliario.

Tabla 6. Tipos de desinfectantes y sus características.

Método	Desinfectante	Características	Eficiencia	Ventajas	Desventajas
Químico	Cloro ^{a,b,f}	Gas cloro Cloro libre (NaOCl, Ca(OCl) ₂)	<ul style="list-style-type: none"> • <i>Escherichia coli</i>: CT_{99%} = 0.034-0.05 • Poliovirus: CT_{99%} = 1.1-2.5 • <i>Quistes de Giardia lamblia</i>: CT_{99%} = 47-150 • <i>Cryptosporidium</i> CT_{99%} = 7200 	<ul style="list-style-type: none"> • Fácil de usar, • Efectivo contra la mayoría de patógenos • Residual estable • Bajo costo 	<ul style="list-style-type: none"> • Rechazo de los usuarios por impartir sabor desagradable al agua • Formación de subproductos de desinfección
	Ozono ^{a,b,c}	Gas incoloro (O ₃), producido por la acción de un campo eléctrico sobre el oxígeno.	<ul style="list-style-type: none"> • <i>Escherichia coli</i>: CT_{99%} = 0.02 • Poliovirus: CT_{99%} = 0.1-0.2 • <i>Quistes de Giardia lamblia</i>: CT_{99%} = 0.5-0.6 	<ul style="list-style-type: none"> • Altamente microbicida • Elimina el color y olor en el agua 	<ul style="list-style-type: none"> • No mantiene dosis residual • Se tiene que generar en el sitio de aplicación • Requiere equipo especial y personal capacitado • Manejo peligroso
	Yodo ^{d,g}	Sólido cristalino, negro-púrpura, volátil.	<ul style="list-style-type: none"> • <i>Escherichia coli</i>: CT_{99%} = 0.38-0.40 • Poliovirus: CT_{99%} = 30 • <i>Quistes de Entamoeba histolytica</i>: CT_{99%} = 80 	<ul style="list-style-type: none"> • Efectiva actividad biocida • Mantiene dosis residual 	<ul style="list-style-type: none"> • Costo 6 a 10 veces mayor que el cloro • La turbiedad incrementa la demanda y el tiempo de contacto • Su empleo a largo plazo podría ocasionar ciertas reacciones en algunas personas sensibles a este producto • Es volátil en soluciones acuosas
	Plata iónica ó coloidal ^{a,d}	Metal pesado (Ag ⁺), afinidad hacia grupos sulfidrido	Se requieren dosis 0,025 – 0,075 mg/l	<ul style="list-style-type: none"> • Propiedades oligodinámicas, efectiva en dosis pequeñas para bacterias • No produce sabor, olor ni color en el agua tratada • No forma subproductos 	<ul style="list-style-type: none"> • Interferencias por materia orgánica y dureza • Mecanismos de resistencia para detoxificar la plata • No es virucida ni paracitida • Mayor tiempo de contacto que para cloro y ozono • Se estima que el costo de la desinfección con plata resulta 200 a 300 veces superior al costo de la cloración

Continúa...

...continuación

Método	Desinfectante	Características	Eficiencia	Ventajas	Desventajas
Físicos	Hervir agua ^{c,d,h}	Incremento de la temperatura mediante energía renovable o fósil	Tiempo de ebullición entre 2 a 5 minutos a 100 °C, para eliminar todo tipo de bacterias patógenas incluso los huevos de helmintos y los esporas. [Cáceres O. 1990]	<ul style="list-style-type: none"> Fácil operación No genera subproductos de desinfección 	<ul style="list-style-type: none"> Si la energía se obtiene de madera causa graves problemas de deforestación, si la fuente es combustible fósil, el costo se incrementa dependiendo del tipo de combustible. No mantiene residual
	Luz UV ^{a,c,d,h}	Lámparas que producen radiación UV-C en la longitud de onda de 250-260 nm	<ul style="list-style-type: none"> Bacterias vegetativas y los protozoarios <i>Cryptosporidium parvum</i> y <i>Giardia lamblia</i>: CT_{99,9%} = 1-10 mJ/cm² Virus entéricos y esporas bacterianas: CT_{99,9%} = 30-150 mJ/cm² 	<ul style="list-style-type: none"> No genera subproductos de desinfección No cambia las características organolépticas del agua 	<ul style="list-style-type: none"> La lámpara debe reemplazarse cada año, generando un costo Costo por uso de energía eléctrica No mantiene dosis residual en el agua Requiere limpieza periódica
	Radiación solar ^{c,d,h,i,j}	Exposición del agua a la radiación UV-A y visible longitudes de onda de 350-450 nm, en contenedores transparentes	<i>E coli</i> : CT _{99,9%} = 500 W.h/m ²	<ul style="list-style-type: none"> Fácil operación y mantenimiento Bajo costo No genera subproductos de desinfección No altera las características organolépticas del agua 	<ul style="list-style-type: none"> No mantiene residual en el agua Interferencias por turbiedad y color Sólo puede aplicarse en días soleados No inactiva esporas y quistes de protozoarios
	Filtración	Retención de sólidos a través de un medio poroso. Pueden ser de medio granular, cerámica o cartuchos de diversos materiales.	<p>Medio granular:</p> <ul style="list-style-type: none"> Moderada-Alta, depende del tamaño del poro y del microorganismo, 90-99% para helmintos y protozoarios; <90% para bacterias. <p>Cerámica:</p> <ul style="list-style-type: none"> Alta-baja, depende del tamaño del poro y la calidad del filtro. <p>Cartuchos:</p> <ul style="list-style-type: none"> Variable, depende del tamaño del poro y la composición del material filtrante. 	<p>Medio granular</p> <ul style="list-style-type: none"> Útil a pequeña escala y a nivel vivienda El medio filtrante generalmente se encuentra disponible Costo bajo-moderado <p>Cerámica</p> <ul style="list-style-type: none"> Tecnología simple y efectiva a nivel vivienda Fácil operación <p>Cartuchos</p> <ul style="list-style-type: none"> Útil a nivel vivienda si hay disponibilidad de material Fácil operación 	<p>Medio granular</p> <ul style="list-style-type: none"> Requiere cierto conocimiento técnico para la fabricación y capacitación para su uso Limpieza periódica <p>Cerámica</p> <ul style="list-style-type: none"> Mano de obra calificada para la construcción Dificultad para calificar la calidad de estos filtros a nivel local Requieren limpieza periódica <p>Cartuchos</p> <ul style="list-style-type: none"> Amplio rango de materiales filtrantes, tamaños de poro y forma. Requieren cierto conocimiento técnico y capacitación.

^aUSEPA, 1999; ^bHurst, 1997; ^cSolsona, 2003; ^dWHO, 2002; ^eReynolds, 1982; ^fLeChevallier and Kwok-Keung 2004;

^gDrinking Water and Health, 1980; ^hSobsey, 2002; ⁱAcra, 1984; ^jWegelin, 1994.

4 PRINCIPALES ALTERNATIVAS DE DESINFECCIÓN EN ZONAS RURALES

En la población rural las bajas coberturas se deben a la dispersión de la población, pero sobre todo a que los municipios no cuentan con los medios económicos, técnicos y operativos necesarios para dotarlas de los servicios básicos. Las tecnologías para mejorar la calidad microbiológica del agua domiciliaria y disminuir la incidencia de enfermedades transmitidas por el agua incluyen varios métodos de tratamientos físicos y químicos, con las características que se describieron anteriormente. De éstos, algunos requieren productos químicos y otros materiales que no se pueden obtener fácilmente en el nivel local a un costo razonable y demandan procedimientos complejos y costosos para tratar el agua.

En un estudio realizado por la OMS (2007), las tecnologías más prometedoras y accesibles para el tratamiento domiciliario del agua son la filtración con filtros de cerámica, la cloración y posterior almacenamiento en un contenedor mejorado, desinfección solar en botellas claras a través de la acción combinada de radiación ultravioleta y calor, la desinfección térmica (pasteurización) en recipientes opacos con luz solar de cocinas solares o reflectores y sistemas combinados que emplean la coagulación-floculación química, sedimentación, filtración y cloración. Se ha demostrado que estos sistemas permiten mejorar significativamente la calidad microbiológica del agua. Los estudios epidemiológicos, del tipo de intervención, han demostrado que dos de ellos, la desinfección solar en botellas plásticas claras (calor más radiación ultravioleta) y la cloración y posterior almacenamiento en contenedores mejorados han reducido en gran medida las enfermedades diarreicas y otras enfermedades infecciosas, incluido el cólera. Con base en su capacidad documentada para mejorar la calidad microbiológica del agua y reducir los riesgos de enfermedades infecciosas transmitidas por el agua, se puede afirmar que estos sistemas de tratamiento y almacenamiento domiciliario son los más efectivos (Acra, 1990; Meierhofer & Wegelin, 2002).

Sin embargo, se debe tener en cuenta cuando se elige una tecnología, que no existe el desinfectante perfecto o ideal. Cada una de ellas presenta objeciones: no inactivan todos los microorganismos, fallan en eliminar quistes o parásitos, no dejan efecto residual en el agua, dependen de productos químicos que la comunidad no puede adquirir, generan subproductos de desinfección que son complicados, caros ó difíciles de tratar. Por estas razones, es necesario realizar una comparación de los diferentes métodos de desinfección del agua en los hogares tomando en cuenta las ventajas, desventajas, costos, puntos críticos de control, disponibilidad de materiales y la sustentabilidad de la tecnología. Finalmente el usuario debe decidir el método a utilizar según sus preferencias, recursos, gustos, confiabilidad, etc.

4.1 COMPARACIÓN DE LOS MÉTODOS DE DESINFECCIÓN DOMICILIARIOS

Varias tecnologías para el tratamiento y almacenamiento del agua en la vivienda, parecen ser accesibles, simples y económicas tanto para países en desarrollo como en los desarrollados. Algunos de estos sistemas se caracterizan por su eficiencia para reducir las enfermedades de transmisión hídrica, por la aceptación de la comunidad, la sustentabilidad y la recuperación de costos. De los sistemas disponibles en la actualidad: hervir el agua, desinfección solar, desinfección por

radiación UV mediante lámparas y la cloración, parecen ser los más utilizados para continuar con su desarrollo, caracterización, implementación y difusión. En la tabla 7 se presenta la comparación de estas tecnologías para mejorar la calidad microbiológica del agua en las viviendas.

Tabla 7. Comparación de las alternativas de desinfección en viviendas.

Criterio	Hervir el agua	Radiación solar	Radiación UV	Cloración
Reducción microbiana	Alta	Alta , extensiva para la mayoría de los patógenos	Alta , extensiva para la mayoría de los patógenos	Alta , extensiva para la mayoría de los patógenos
Reducción de enfermedades diarreicas	Sí, extensiva	Sí, 9-26% en dos estudios	No hay estudios epidemiológicos, pero se espera debido a los efectos germicidas	Sí, 15-48%, muchos estudios
Desinfectante residual	No	No	No	Sí
Requerimientos de calidad del agua a tratar	No	Baja turbiedad (<30 UTN)	Baja turbiedad (<30 UTN), baja cantidad de solutos absorbentes de UV como materia orgánica natural, hierro y sulfitos	Ninguno, aplicable a agua de pobre calidad
Cambios químicos en el agua	No, excepto disminución de oxígeno y precipitación química	Ninguno o no significativo	Ninguno ó muy poco	Sí, puede causar olor y sabor y subproductos de desinfección
Potencial recrecimiento de microorganismos en el agua tratada	Sí, si se almacena el agua por más de de 1 ó 2 días	Sí, si se almacena el agua por más de de 1 ó 2 días	Sí, si se almacena el agua por más de de 1 ó 2 días	Ninguno si se mantiene el cloro residual
Nivel de habilidad y facilidad para utilizarse	Bajo, fácil de utilizar	Bajo, fácil de utilizar	Habilidad moderada, entrenamiento para el mantenimiento y sustitución de lámparas	Bajo, fácil de utilizar con entrenamiento
Disponibilidad y necesidad de materiales	Requiere de una fuente de combustible	Requiere contenedores y una superficie reflejante para colocarlos	Requiere dispositivos de UV, reemplazo de lámparas y una fuente de electricidad	Requiere de una fuente de cloro y manejo y almacenamiento adecuados
Limitaciones en el volumen de agua a tratar	Sí, depende de la capacidad del lugar donde se realice	Sí, se pueden tratar de 1 a 2 lt por contenedor aunque pueden tratarse varios contenedores al mismo tiempo	No, los dispositivos pueden tratar varios litros por minuto, dependiendo del tamaño de la lámpara y del volumen del reactor	No, se puede escalar
Requerimientos de verificación de la operación	Observar el punto de ebullición del agua	Observar si el día es soleado ó nublado, determinar si se alcanza la temperatura adecuada	Verificar el buen funcionamiento de la lámpara	Medir el cloro residual
Aceptabilidad	Alta	Alta a moderada	Alta	Alta a moderada
Sustentabilidad	Alta, depende de la disponibilidad del combustible	Alta	Alta	Alta
Tiempo de tratamiento	Minutos a decenas de minutos	Horas (día soleado), días (nublado), no es efectivo si no hay sol	Segundos a minutos, dependiendo del volumen de agua a tratar y del diseño del dispositivo	Decenas de minutos

Fuente: Sobsey, 2002.

En cuanto a costos, en la tabla 8 se presenta una estimación, ya que éstos varían dependiendo de las condiciones locales y de la disponibilidad de materiales.

Tabla 8. Costos para métodos de desinfección domiciliarios.

Sistema	Materiales importados	Costo inicial (per cápita; por vivienda)	Costo anual per cápita y vivienda
Hervir el agua	Ninguno	Ninguno, asume el uso de infraestructura existente	Varía con el precio del combustible, caro en general
Desinfección solar	Ninguno, asume el uso de contenedores disponibles	Varía, depende del material de la superficie reflejante	Ninguno
Radiación UV con lámparas	Lámparas UV, y envase	\$700-1 200 pesos	Costo de electricidad más costo del reemplazo de la lámpara \$150-200 pesos/cada año
Cloración	Compra del cloro	ninguno	\$10-30 pesos, dependiendo de la fuente

Fuente: Adaptado de Sobsey, 2002
Costo en pesos mexicanos (M.N.)

De las características descritas para cada tecnología, se puede concluir que la que presenta menores requerimientos de materiales, capacitación, costos de inversión y mantenimiento; no genera subproductos de desinfección ni afecta las características fisicoquímicas y organolépticas del agua; y que además diversos estudios demuestran que mejora significativamente la calidad microbiológica del agua, es la desinfección solar.

Las desventajas son que la radiación solar depende de las características climatológicas del lugar y la presencia de turbiedad en el agua a tratar interfiere con el proceso de desinfección. Sin embargo, a pesar de estas limitantes, la desinfección solar es uno de los métodos más prometedores y que se siguen estudiando para el tratamiento domiciliario del agua. De aquí que en el IMTA se consideró la necesidad de evaluar esta alternativa mediante el uso de un concentrador solar que permitiera incrementar la dosis de radiación en contenedores de plástico (PET) transparentes y con la mitad pintada de negro para aumentar la temperatura y de esta manera mejorar la eficiencia en la inactivación de bacterias patógenas.

En el siguiente capítulo se describe con mayor detalle la desinfección solar, incluyendo los principios, características, condiciones de aplicación, estudios en campo por diversos autores, ventajas y desventajas que permiten justificar el uso de esta tecnología como una alternativa efectiva para la desinfección del agua en las viviendas.

5 DESINFECCIÓN MEDIANTE RADIACIÓN SOLAR

El tratamiento para controlar la contaminación microbiológica mediante la exposición del agua a la luz del sol, se ha desarrollado, evaluado e implementado en campo en diferentes partes del mundo (Acra *et al.*, 1984; Conroy *et al.*, 1996; Márquez *et al.*, s/f; Wegelin *et al.*, 1994). La aplicación de este método es sencilla y consta de los siguientes pasos: a) Colocar agua clara (sin turbiedad) en contenedores que permitan la transmisión de la radiación hacia el agua, b) exponer el agua al menos durante cinco horas a la radiación solar, c) dejar enfriar el agua desinfectada y consumir el mismo día. Existen diferentes sistemas de tratamiento, desde los más simples, que sólo consisten, como ya se describió, en exponer los contenedores al sol, hasta los más complejos, que utilizan dispositivos para concentrar la radiación solar, en diferentes geometrías, ya sea fijos ó con sistemas para seguir el movimiento del sol (Almanza, 1994).

En este caso, el agua se expone a la luz UV-A, en el rango de 350-450 nm, que aunque no corresponde a la porción del espectro con mayor poder germicida, con la combinación de la radiación en dosis integrada de al menos de 500 W/m² y el incremento de la temperatura entre 50 y 60°C por un prolongado periodo de tiempo, se obtiene como resultado la inactivación de los microorganismos patógenos (Acra *et al.*, 1984, Wegelin *et al.*, 1994, Sobsey, 2002).

Pero, no obstante su sencillez, para aplicar adecuadamente este método y obtener agua con calidad microbiológica aceptable, se debe tener en cuenta que esta tecnología depende de (Meierhofer *et al.*, 2002; Witt, 1993; Acra, *et al.*, 1984):

- La radiación solar y longitudes de onda efectivas
- Latitud y localización geográfica, época del año, hora del día y condiciones meteorológicas.
- La temperatura

Además, existen parámetros que pueden controlarse para hacer más eficiente el proceso de desinfección solar, entre los que se encuentran:

- Utilización de concentradores para incrementar la eficiencia de la desinfección solar.
- Material, transparencia y grosor de las paredes del contenedor de agua, así como de la profundidad de la columna de agua.
- Características ópticas del agua y los constituyentes que interfieren: color, sólidos disueltos y sólidos suspendidos.

5.1 RADIACIÓN SOLAR

La radiación solar se compone de ondas electromagnéticas provenientes del Sol. Una onda electromagnética consiste de pequeños paquetes de energía denominados fotones. La energía de cada fotón es directamente proporcional a la frecuencia de la onda: cuanto mayor es la frecuencia, mayor es la cantidad de energía de dicho fotón. La forma en que las ondas electromagnéticas afectan a los sistemas biológicos viene determinada por la intensidad del campo y por la cantidad de energía de cada fotón (Almanza *et al.*, 1994).

Existen dos tipos de radiación: las radiaciones ionizantes (RI) y las radiaciones no ionizantes (RNI). La frecuencia de la luz solar (luz visible) es la línea divisoria entre las RI, más potentes y de frecuencias más altas (tabla 9), que transmiten a los sistemas biológicos energía suficiente como para romper enlaces atómicos y dividir moléculas en iones, positivos y negativos en un fenómeno conocido como “ionización”. Las RNI, más benignas y de frecuencias más bajas (Adur, 2004), comprenden la porción del espectro electromagnético que posee energías de fotón demasiado débiles para romper las uniones atómicas, incluso las RNI de alta intensidad son incapaces de provocar ionización de los sistemas biológicos. Las RNI se dividen a su vez en regiones ó bandas como se muestra en la Figura 7. Las aplicaciones prácticas de la energía solar comprenden únicamente la radiación solar directa de longitudes de onda entre 0.29 y 2.5 μm (Almanza *et al.*, 1994), que es el 95.19% de la constante solar, es decir, 1 301 W/m².

Tabla 9. Clasificación de las radiaciones electromagnéticas

RADIACIONES ELECTROMAGNÉTICAS	
IONIZANTES	NO IONIZANTES
Rayos Gamma Rayos X	Campos estáticos Ondas EBF Ondas MBF Ondas de RF Microondas Infrarrojo Luz visible Ultravioleta

EBF: Extremadamente baja frecuencia, MBF: Muy baja frecuencia, RF: Radio frecuencia.
Fuente; Adur, 2004

En el rango de las radiaciones ópticas (UV-A, visible e IR), los efectos biológicos se deben principalmente a fenómenos fotoquímicos (Fig. 7).

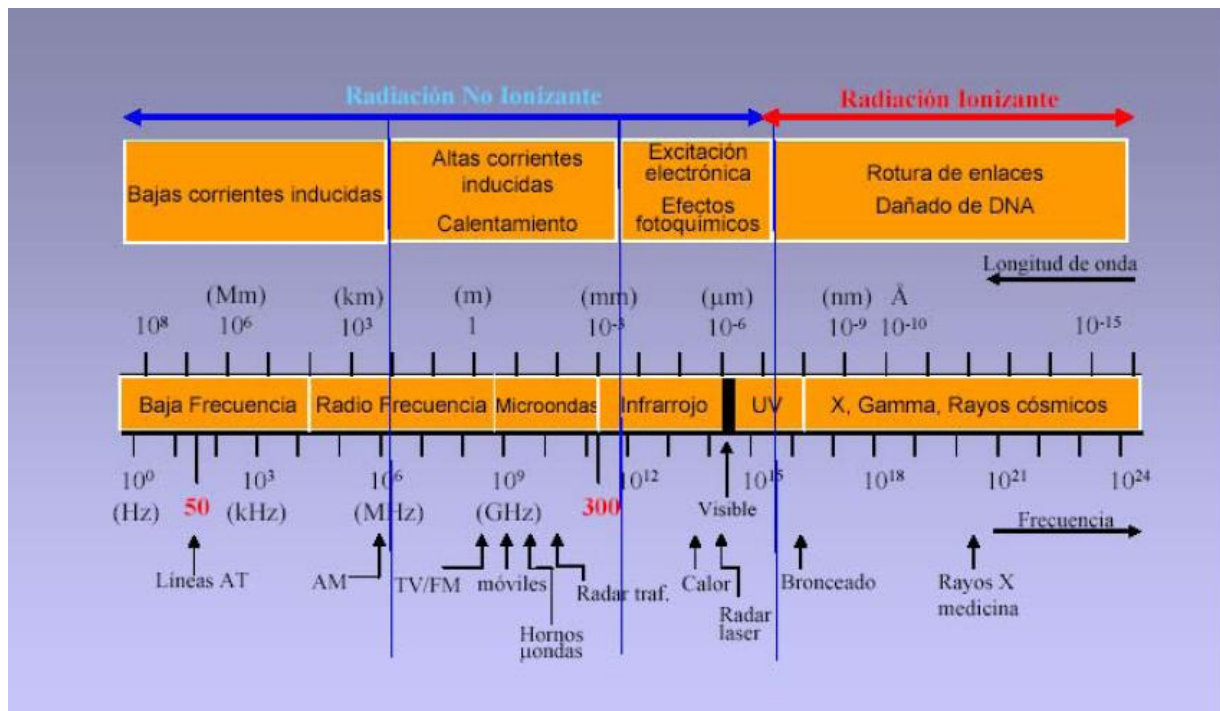


Figura 7. Regiones de la radiación electromagnética.

Fuente: Adur, 2004.

Los procesos fotoquímicos se producen cuando la radiación electromagnética puede interactuar con las moléculas dando lugar a la absorción de energía en forma cuantizada, que puede ser utilizada para reorganizar sus enlaces produciendo otras moléculas. Los efectos fotoquímicos ocurren con energía electromagnética en la región del espectro de la radiación solar entre 300 y 700 nm, que es la que atraviesa la atmósfera (tabla 10 y con la cual se lleva a cabo el proceso de desinfección solar (Acra, 1984).

La radiación electromagnética se puede ordenar en un espectro que se extiende desde longitudes de onda corta de billonésimas de metro (frecuencias muy altas) hasta longitudes de onda larga de muchos kilómetros (frecuencias muy bajas). La luz visible es sólo una pequeña parte del espectro electromagnético. Por orden creciente de longitudes de onda (o decreciente de frecuencias), el espectro electromagnético está compuesto por rayos gamma, rayos X duros y blandos, radiación ultravioleta, luz visible, rayos infrarrojos, microondas y ondas de radio.

Tabla 10. Efectos atmosféricos sobre las radiaciones electromagnéticas.

Banda	Longitud de onda (nm)	Efectos atmosféricos
Rayos Gamma	<0.03	Completamente absorbido por la atmósfera superior
Rayos X	0.03-3	Completamente absorbido por la atmósfera superior
UV-C	100-280	Completamente absorbido por el oxígeno, nitrógeno y ozono en la atmósfera superior
UV-B	280-315	Completamente absorbido por el oxígeno, nitrógeno y ozono en la atmósfera superior
UV-A	315-400	Transmitido a través de la atmósfera, pero con dispersión severa
Visible	400-700	Transmitido a través de la atmósfera con moderada dispersión de las ondas más cortas
Infrarrojo reflejado	700-3000	Principalmente radiación reflejada
Infrarrojo térmico	3000-14000	Absorción en específicas longitudes de onda por dióxido de carbono, ozono y vapor de agua.

Fuente: Adaptado de Acra, 1984; Adar, 2004.

Las causas de que sólo se pueda aprovechar la región UV-A y parte del visible para la desinfección solar, se deben a que el flujo primario de radiación solar al llegar a las capas superiores de la atmósfera comienza a sufrir modificaciones por absorción y dispersión en gases y partículas. A partir de los 50 km y hacia las capas atmosféricas más bajas, la radiación solar sufre modificaciones significativas por absorción en el ozono (O₃) el cual elimina del flujo primario casi toda la radiación UV que de otra manera afectaría de forma fatal a los organismos vivos que habitan en la superficie terrestre. Dentro de la estratosfera, además del ozono, hay atenuación (absorción y dispersión) en el sistema de partículas causadas por destrucción de meteoritos y erupciones volcánicas.

En la estratosfera inferior y en la troposfera se tienen los componentes atmosféricos que modulan el flujo de radiación solar: el vapor de agua, el CO₂ y las partículas en suspensión. Este flujo modulado se conoce como flujo secundario y consta de dos componentes: Flujo de radiación directa y difusa. *El flujo de radiación directa* es el

que proviene en línea directa de la fuente (el Sol) y que llega atenuado al observador por absorción y dispersión en gases y partículas; *el flujo de radiación difusa* se forma con la radiación dispersada, también por gases, partículas y sistemas de nubes hacia el punto de observación.

Este flujo de radiación puede por tanto, cambiar su magnitud, dirección y longitud de onda dando lugar a los siguientes fenómenos:

- La radiación puede transmitirse a través de un objeto transparente como el aire, agua ó vidrio con cambios en la velocidad y dirección.
- La radiación puede ser parcialmente ó completamente absorbida por un objeto, los componentes así absorbidos dependen de la longitud de onda de la radiación específica y las características del objeto.
- La radiación puede dispersarse al reflejarla en todas direcciones, como cuando pasa a través de la atmósfera.
- La radiación puede reflejarse, regresándola desde la superficie de un objeto, sin cambiar su forma, excepto por la desviación por el ángulo de reflexión.

Como resultado de los fenómenos atmosféricos que incluyen la reflexión, difusión y absorción de la radiación, la cantidad de energía solar que llega a la superficie de la tierra es muy reducida en intensidad. Durante el día, la cantidad de radiación difusa puede llegar al 10% del total de radiación solar, a medio día y en condiciones de cielo claro. Este valor puede incrementarse hasta el 20% temprano por la mañana y al caer la tarde. Es importante, por estas razones, tener en cuenta la considerable disminución de radiación durante días nublados, que sólo proporcionarían radiación difusa, y mucho menos radiación solar al inicio y final del día, afectando directamente el proceso de desinfección solar.

Además de estos factores, se debe tener en cuenta que la intensidad del haz directo depende también de la altitud del sol, la latitud y estación del año. Esto se debe a que la tierra describe una órbita elíptica alrededor del sol cuya configuración se determina por tres parámetros: la excentricidad (e), la oblicuidad (o) y la posición angular del perihelio (w) con respecto al equinoccio de primavera; se tiene que la inclinación del plano ecuatorial terrestre con respecto al plano de la elíptica (plano de la órbita) causa que para diferentes épocas del año, el sol alumbre perpendicularmente sobre diferentes paralelos. Durante el verano (del hemisferio norte) el sol alumbra perpendicularmente en latitudes norte; alrededor del 21 de junio, lo hace sobre el paralelo de los 23.5°N conocido como trópico de Cáncer, mientras que el 21 de diciembre lo hace sobre el Trópico de Capricornio (23.5°S). Necesariamente entre ambas posiciones extremas el Sol alumbra perpendicularmente sobre el ecuador terrestre en dos ocasiones: el 21 de Marzo (equinoccio de primavera) y el 21 de septiembre (equinoccio de otoño).

A partir de esta información, se propuso la distribución geográfica de la radiación solar a una escala general, dividida en términos de intensidad en cuatro cinturones alrededor de la tierra (Acra, 1984):

- El cinturón más favorable. Se localiza entre las latitudes 15°-35°N. Estas regiones semiáridas se caracterizan por tener la cantidad más grande de radiación solar con más del 90% proveniente de radiación directa debido a la

baja nubosidad y lluvia (menos de 250 mm por año), tienen más de 3000 horas de luz solar por año.

- Cinturón moderadamente favorable. Este cinturón cae entre el ecuador y latitud 15°N y es la región que sigue al cinturón más favorable. A causa de la alta humedad y la frecuente nubosidad, la proporción de radiación difusa es alta. Se tienen 2500 horas de luz del sol por año. La intensidad solar es casi uniforme en el año ya que las variaciones estacionales son ligeras.
- Cinturón menos favorable. Se localiza entre las latitudes 35-45°N y aunque el promedio de radiación solar es similar que en las regiones anteriores, se presentan marcadas variaciones estacionales en la intensidad de la radiación y las horas de luz solar. Durante los meses de invierno la radiación solar es relativamente menor que en el resto del año.
- Cinturón mucho menor favorable. Esta región se localiza más allá de los 45°N de latitud. Incluye a la unión soviéticas y sus ex repúblicas y la mayor parte del norte de Europa y Norte América. En esta región, la mayor parte de la radiación es difusa con una mayor proporción en invierno que en verano, causada por una alta cobertura de nubes.

La mayoría de los países en desarrollo se localizan dentro de las latitudes más favorables (35°N y 35°S). La República Mexicana se encuentra entre las latitudes 15° y 35° N y por tanto se considera que la radiación solar es una fuente de energía aprovechable de distintas maneras, incluyendo la desinfección solar del agua para consumo humano.

Esta disponibilidad hace que esta tecnología sea de bajo costo ya que se obtiene en el sitio de aplicación, no requiere energía adicional y no genera impactos negativos al ambiente y más importante, es de fácil implementación y uso práctico a nivel vivienda.

5.1.1 Efecto de la radiación solar sobre los microorganismos

Downes y Blount fueron quienes desde el siglo XIX, reconocieron los efectos de la luz solar sobre las bacterias. Los rayos ultravioleta, violeta y azules del espectro son bactericidas en tanto que los verde, amarillos y rojos son menos deletéreos.

En 1910, se establecieron las bases tecnológicas para el uso de la luz ultravioleta. Durante las tres décadas siguientes, se determinó que la longitud de onda óptima para la desinfección se encuentra en el ámbito de 250 a 266 nm y que la sensibilidad a las diversas longitudes de onda depende de las especies y cepas de microorganismos (Margolin, 1997).

En la década de los 60, se demostró que el mecanismo de desinfección mediante radiaciones ultravioleta, se debe a que este mutágeno físico lesiona el material genético, esto es al ácido desoxirribonucleico (ADN), al favorecer el enlace de bases vecinas de timina para formar dímeros timina-timina (Fig. 8), o al producir rompimientos.

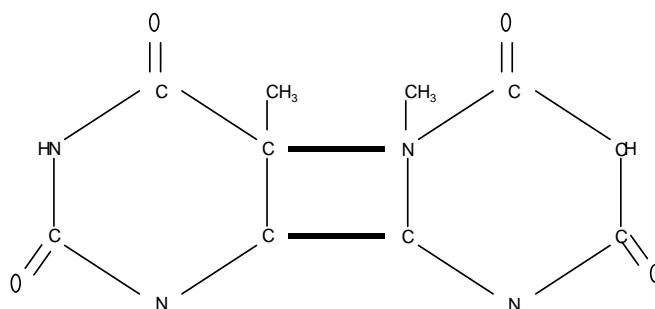


Figura 8. Dímeros de timina
(Fuente: Gaudy y Gaudy, 1980).

Más específicamente, parece que la energía ultravioleta tiene su mayor efecto sobre las pirimidinas y es menos efectiva sobre las purinas. Aunque los dímeros predominantes son los de timina-timina, la polimerización no está limitada a estas bases; también se ha observado en los pares citosina-citosina y citosina-timina. En el caso de los virus de ácido ribonucleico (ARN), como por ejemplo los enterovirus y los rotavirus, se especula que ocurre dimerización de uracilo (Margolin, 1997; Brooks, *et al.*, 1996).

En el caso de la desinfección solar, el principal efecto se debe a la radiación solar en la región UVA y visible (300-400 nm), el efecto antimicrobiano de la luz visible se debe casi totalmente a la formación de oxígeno singlete en el citoplasma de las células, esta forma de oxígeno es altamente reactiva y por tanto letal (Tortora *et al.*, 1989).

Existe además un segundo mecanismo de efecto de la luz visible, que no implica al oxígeno molecular, en el cual la molécula que capta la luz (todas las células poseen moléculas tales como los citocromos, flavinas y clorofilas, que son capaces de absorber luz visible), se activa elevándose a un estado de energía superior, el regreso al estado basal transfiere su energía a cualquier componente celular dando lugar a la formación de radicales libres que también son altamente reactivos y pueden dar lugar a la formación de compuestos tóxicos (Brock *et al.*, 1987).

Khaengraeng (2005) encontró que la foto oxidación es la principal razón de la inactivación microbiana y que el proceso responsable para la inactivación es la producción dependiente de la luz, de formas reactivas de oxígeno, incluyendo radicales libres de oxígeno tales como superóxido y radicales hidroxilo, junto con derivados tóxicos tales como el peróxido de hidrógeno. Las especies de oxígeno reactivo (EOR) se generan principalmente por la absorción de luz mediante fotosensibilizadores endógenos, por ejemplo, porfirinas intracelulares y flavinas, aunque también pueden actuar fotosensibilizadores exógenos.

Slieman *et al.* (1999), demostraron que las esporas de *Bacillus subtilis* expuestas al espectro completo de luz solar, da lugar a la acumulación de cadenas de ADN rotas no apareadas, rupturas en cadenas apareadas y acumulación de dímeros de ciclobutano pirimidina, lo que indica que en la naturaleza ocurre un fenómeno altamente complejo de formación de fotoproductos en los organismos.

Con relación a la susceptibilidad de las bacterias a la luz solar, los bacilos Gram-negativos son mucho más susceptibles a la inactivación que los cocos Gram-positivos, para inactivar a estos últimos son necesarias dosis 5 a 10 veces superiores.

Un problema que se presenta en los métodos de desinfección mediante irradiación ultravioleta, es que las proteínas absorben esta luz, de aquí que los virus con una cápside exterior densa o compacta (p. ej., bacteriófago *MS-2*), o la formada por dos capas (p. ej., rotavirus), sean en general más resistentes a la inactivación ultravioleta que otros virus de ARN de una sola cadena (virus de la polio o hepatitis) (Margolin, 1997). Chang *et al.* (1985), observaron que las dosis de radiación UV necesarias para la inactivación del 99.9% de bacterias en estado vegetativo (no esporas), coliformes totales y bacterias heterótrofas mesofílicas aerobias (cuenta estándar) fueron comparables; en tanto que las dosis requeridas para virus, esporas bacterianas y quistes de amibas, son 3 a 4 veces, 9 veces y 15 veces, respectivamente, superiores a las dosis requeridas para inactivar *Escherichia coli*.

Acra *et al.* (1984), en las pruebas de campo por lotes, para evaluar el efecto de las radiaciones solares sobre los microorganismos, concluyeron que:

- Las cepas de *Escherichia coli* son ligeramente más resistentes a la acción letal de las radiaciones que *Pseudomonas aeruginosa*, *Shigella flexneri*, *Salmonella typhi* y *Salmonella paratyphi*.
- *Escherichia coli* puede ser un buen indicador de la efectividad de la luz solar sobre bacterias entéricas.
- Las bandas del espectro solar, que tienen efectos letales sobre los microorganismos son las de UV-A (320 a 400 nm) y en menor grado la banda visible de violeta a luz azul (400 a 490 nm).

En experimentos de flujo continuo, Acra, *et al.* (1990), concluyeron:

- Al comparar *Escherichia coli*, coliformes totales y *Streptococcus faecalis*, observó que los últimos son ligeramente más resistentes.
- Altas concentraciones de bacterias presentan menor sensibilidad a la radiación solar, que comparado con concentraciones moderadas o bajas.
- La desinfección solar del agua puede aplicarse efectivamente si la intensidad de la radiación promedio es de al menos 555 W/m² durante aproximadamente 5 horas, y el agua cruda no excede 1000 coliformes/100ml.

5.2 TEMPERATURA

La temperatura es uno de los parámetros ambientales más importantes que condicionan el crecimiento y la supervivencia de los microorganismos. La temperatura afecta la velocidad de crecimiento y por lo tanto al tiempo de generación. Cada bacteria muestra una curva característica de crecimiento en función de la temperatura en donde se distinguen tres puntos característicos:

- Temperatura mínima, por debajo de ella no hay crecimiento.
- Temperatura máxima, por encima de ella no hay crecimiento.
- Temperatura óptima, permite la máxima tasa de crecimiento.

A partir de la temperatura óptima, si se sigue elevando la temperatura se produce un descenso de la tasa de crecimiento hasta alcanzar la temperatura máxima, en este punto se tienen como consecuencias:

- Desnaturalización e inactivación de proteínas enzimáticas esenciales
- Colapso de la membrana citoplasmática
- Lisis térmica de la bacteria.

5.2.1 EFECTO DE LA TEMPERATURA EN LOS MICROORGANISMOS

Aunque la desinfección solar del agua para consumo humano ha cobrado interés en los últimos años, y se ha explicado parcialmente el efecto de la luz sobre los microorganismos, no existen aún estudios que detallen la contribución netamente térmica al proceso.

El efecto de las temperaturas inferiores a las de ebullición sobre los microorganismos, depende del microorganismo en particular y de la intensidad de la aplicación. Por ejemplo, las bajas temperaturas (0 – 7 °C) tienen un efecto bacteriostático, es decir las bacterias no se multiplican debido a que la tasa metabólica se reduce. La pasteurización, que es calentamiento durante 15 segundos a 72 °C, mata a los microorganismos patógenos y a algunos no patógenos, y no tiene efecto sobre las esporas (Tortora *et al.*, 1997).

Wegelin *et al.* (1994), reportaron que existe sinergismo de las radiaciones con la temperatura por arriba de 55 °C, pues observaron un incremento del efecto germicida de la radiación solar por un factor de aproximadamente 2 para *Streptococcus faecalis* y *Escherichia coli*, pero no estudiaron el efecto de la temperatura de manera aislada.

Ciochetti y Metcalf (1984), recuperaron coliformes totales en muestras de agua que habían sido pasteurizadas en estufas solares, a temperaturas de 50, 55 y 59.5 °C, sin especificar el tiempo de exposición. Joyce *et al.* (1996), reportaron que en muestras de 2 litros de agua, contaminadas con 2X10⁶ Unidades Formadoras de Colonia /100 ml (UFC/100ml) de *Escherichia coli*, y calentando a las temperaturas que estos volúmenes de agua alcanzaban durante la exposición a la luz solar en Kenya, la desinfección total se logra en 7 horas y no hubo recrecimiento después de 12 horas de almacenamiento. En las pruebas en continuo realizadas por Acra *et al.* (1990), no se demostró que en el proceso de desinfección, temperaturas entre 12 y 40 °C tuvieran alguna influencia.

McGuigan *et al.* (1998), reportaron que en el estudio realizado con aislamientos de *Escherichia coli* de Kenya, almacenados en botellas de plástico y expuestos a la luz solar, la inactivación térmica es importante solamente cuando el agua alcanza temperaturas superiores a 45 °C, en donde se observa una fuerte sinergia con el efecto óptico. Concluyen que en sitios con alta insolación, la desinfección mediante energía solar es un método efectivo de bajo costo para mejorar la calidad del agua.

Cuando la temperatura se incrementa entre 50 y 60 °C y el agua se expone a un periodo de tiempo mayor de una hora, se obtiene el 99.9% de remoción de bacterias,

virus y parásitos (Sobsey, 2002). Fujioka (2001), reportó remociones >3 log para *Escherichia coli*, *Enterococcus* y bacterias heterótrofas cuando el agua se expuso a tiempos de 2-5 horas, la remoción para esporas de *Clostridium perfringens* fueron de 2 a 3 log.

5.3 CONCENTRADOR SOLAR

Un concentrador solar es un dispositivo que concentra la componente directa de la radiación solar sobre un absorbedor (Almanza, 1996); tiene como finalidad incrementar el flujo de radiación sobre los receptores. Los concentradores pueden ser reflectores o refractores, pueden formar imagen solar o no formarla, pueden seguir al sol, tener ajustes periódicos o estar fijos, pueden ser cilíndricos para enfocar sobre una línea (bidimensionales) o circulares para enfocar sobre un punto (tridimensionales).

En estos dispositivos se obtiene alta densidad de energía (radiación concentrada) sobre un absorbedor, suficiente para lograr temperaturas mayores de 200°C , pudiéndose llegar a $3\ 800^{\circ}\text{C}$. Para lograr altas concentraciones (arriba de 100) se requieren mecanismos muy precisos para seguir el movimiento virtual del Sol.

Los concentradores estacionarios o fijos se caracterizan por su concentración mayor que 1 y menor que 10; no requieren un seguimiento preciso sino sólo un ajuste ocasional a lo largo del año. En cambio, los concentradores con razón de concentración dentro del intervalo de 10 a 3 000 necesitan que sus curvaturas geométricas sean muy precisas, al igual que su mecanismo seguidor.

Los concentradores estacionarios menos complejos son los que no requieren seguimiento continuo del sol; estos tienen un ángulo de aceptación muy grande, concentración baja y diseño con base en alguna curvatura sencilla; su orientación debe ser en dirección este-oeste a fin de obtener mejor aprovechamiento de los ángulos de aceptación grandes; las concentraciones pueden llegar hasta 10 con un tiempo de captación del orden de 7 h, con ajuste una vez al día. Uno de los concentradores más simples se muestra en la Figura 9 con colectores horizontales y espejos inclinados que reflejan la radiación sobre el colector.

Los receptores de los sistemas de concentración solar también pueden ser además de cilíndricos o planos, elípticos o tener alguna otra forma convexa. En general, los concentradores solares que tienen receptores mucho más pequeños que la apertura son efectivos solo para absorber la radiación directa. El ángulo de incidencia de la radiación solar directa sobre el concentrador es muy importante, por lo que se requiere generalmente de sistemas de seguimiento del sol.

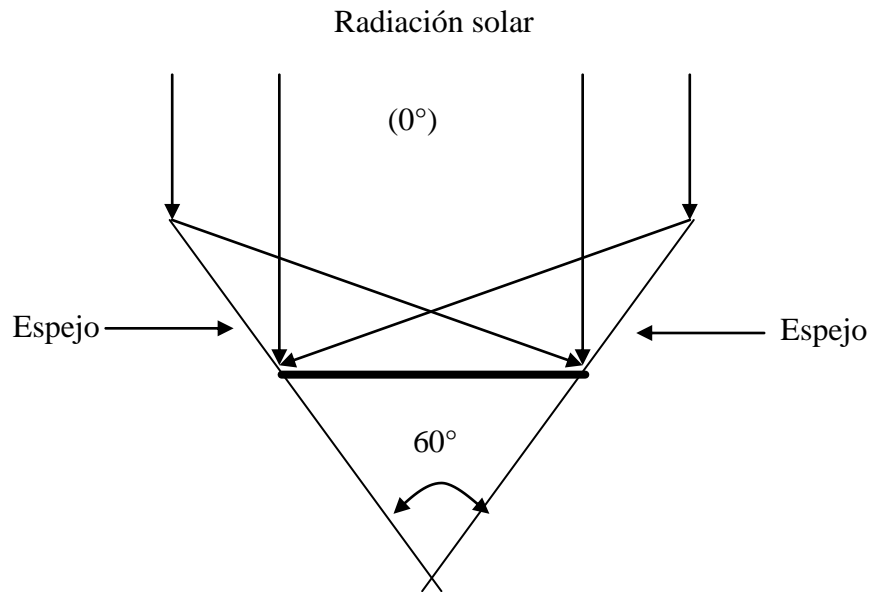


Figura 9. Concentrador con espejos inclinados, colector horizontal.

Fuente: Almanza; 1994

Ventajas

- La cantidad de energía colectada sobre la superficie de absorción por unidad de área se aumenta, con lo cual se pueden alcanzar altas temperaturas aprovechables en algún ciclo termodinámico o en dispositivos termoiónicos, termoeléctricos, magnetohidrodinámicos u otros.
- Se reducen las pérdidas de calor si se utiliza un absorbedor de menor área también se reducen efectos transitorios, ya que la masa térmica es mucho más pequeña que en colectores planos.
- Los costos se reducen ya que se reemplaza un absorbedor costoso por un área reflectora o refractora menos costosa.

Desventajas

- Trabajan solo con la componente directa de la radiación solar; el criterio de selección de estos sistemas debe incluir características geográficas, quedando restringida su utilización a lugares de alta insolación.
- La calidad óptica de la superficie reflectora requiere mantenimiento y protección intensiva contra su exposición a la intemperie.

5.3.1 Superficies reflejantes

Existen dos tipos de superficies reflejantes (Almanza, 1996); una se usa para reflejar la radiación solar directa incidente sobre un absorbedor deseado; el otro tipo se puede usar como superficie selectiva de muy baja emisividad sobre absorbedores fototérmicos.

Las superficies que reflejan la radiación directa son los espejos. Los espejos deben tener buena reflejancia espectral, que es la habilidad de una superficie y su eficiencia para poder reflejar la radiación incidente. Existen materiales que reflejan eficientemente en un punto del espectro pero son muy pobres en otros. Los mejores reflectores de energía solar son la plata y el aluminio, los cuales tienen reflejancias de 0.92 y 0.87 respectivamente. El cobre y el oro son buenos reflectores en el infrarrojo pero son ineficientes para reflejar el visible.

También deben presentar reflejancia especular, que es la cantidad de energía (radiación) que se refleja directamente de la superficie reflectora con el mismo ángulo que el haz incidente contenida dentro de un ángulo sólido. Existen algunos dispositivos para medir reflejancia especular como los espectrofotómetros y los reflectómetros. La especularidad de un material plano pulido ópticamente nos indica su adaptabilidad para usarlo como reflector solar.

Un requerimiento adicional para tener un buen reflector es su acabado plano (rugosidad) ya que generalmente deben seguir al sol y debe esperarse que cada porción de la superficie reflectora apunten en dirección adecuada.

Un buen espejo debe cumplir los siguientes requerimientos para aplicarse eficientemente en procesos que utilicen energía solar:

- El valor de su reflejancia no debe ser menor de 85%
- Debe ser altamente especular, es decir, el espejo debe ser capaz de reflejar la energía en un haz que se disperse en menos de 2 milirradianes
- La propiedad de reflejancia del espejo debe conservarse en las condiciones ambientales por lo menos durante 5 años
- Su mantenimiento en el lugar de trabajo debe ser sencillo o en su caso la sustitución del mismo debe ser fácil
- Bajo costo
- Tener resistencia a la radiación UV y contaminantes así como poca degradación ambiental

5.4 CARACTERÍSTICAS DE LOS CONTENEDORES

Una de las ventajas más importantes de la desinfección solar es su facilidad de aplicación y bajo costo. Uno de los componentes que contribuyen al mantener la sustentabilidad de la tecnología es el material del contenedor ya que éste puede conseguirse localmente y en algunos casos se utiliza material de reuso, por lo que incluso, puede no tener costo.

Aparte de la disponibilidad, otro factor importante es que el material permita el paso de la radiación solar hacia el agua, es decir, que tenga una transmitancia alta, mayor a 0.8 (Hossein, 2007); esto debido a que la energía solar que llega a un medio transparente, es parcialmente reflejada y absorbida; el remanente se transmite. Los valores relativos de la transmitancia dependen de las propiedades ópticas del material transparente y del espectro solar (Tabla 11).

Entre los materiales que han utilizado en diversos estudios se encuentran el vidrio y diversos plásticos (Márquez, s/f; Wegelin, 1998; Martín *et al.*, 1999; Berney *et al.*,

2006; Boyle *et al.*, 2008); sin embargo, el que ha mostrado mayor disponibilidad, durabilidad y transmitancia de luz UV-A, es el Polietilén tereftalato (PET), en botellas de 1-2 litros (Martin *et al.*, 1999; Hossein, 2007; Berney, 2006; Wegelin, 2001; Dejung, 2007; Boyle, 2008) además de que posee bajo peso, es neutral en sabor y químicamente estable. Las botellas de PET generalmente se utilizan para el envasado de agua y refrescos.

Otra característica es la columna de agua. La radiación UV se reduce con la profundidad del agua; con 10 cm y con turbiedad de 26 UTN, ésta disminuye en 50%. Por lo tanto, los contenedores que se utilizan para desinfección solar no deben exceder los 10 cm de profundidad de agua. Las botellas de PET de dos litros colocadas horizontalmente no exceden la profundidad recomendada.

Tabla 11. Absorción de energía solar a través de diversos materiales

Material	Observaciones
Vidrio común	Transmite más del 90% de las radiaciones UV-A y visibles, si es delgado. Contenido de Fe ₂ O ₃ superior a 0.035%, disminuye la transmitancia. Es opaco a las regiones UV-B y UV-C del espectro.
Vidrio de borosilicato	Es opaco en la región UV-B y alcanza la máxima transmisión a 340 nm y más allá.
Plásticos transparentes como el Plexiglas y Lucite	Transmiten bien las bandas UV y visible.
Polietileno	Transmite algunos componentes germicidas de la luz solar.
Polietilén tereftalato PET	Transmite la luz UV y visible.

Fuente: Meierhofer *et al.*, 2002.

En lo que respecta al mantenimiento, debe cuidarse el envejecimiento de las botellas de PET ya que con el tiempo sufren daño mecánico (rayaduras) y liberación de fotoproductos, disminuyendo la transmitancia y por lo tanto, la eficiencia en la inactivación de los microorganismos (Wegelin, 2001). Esto es porque la luz UV no sólo destruye los microorganismos sino también transforma el material plástico en fotoproductos cuando se llevan a cabo reacciones fotoquímicas que resultan en cambios en las propiedades ópticas del material (Kohler, 2003). Con el curso del tiempo los aditivos se liberan de la matriz del material y la transmitancia en el rango espectral de 320 a 400nm se reduce. En las Figuras 10 y 11 se muestran ejemplos de la pérdida de transmitancia por daño mecánico y fotoproductos.

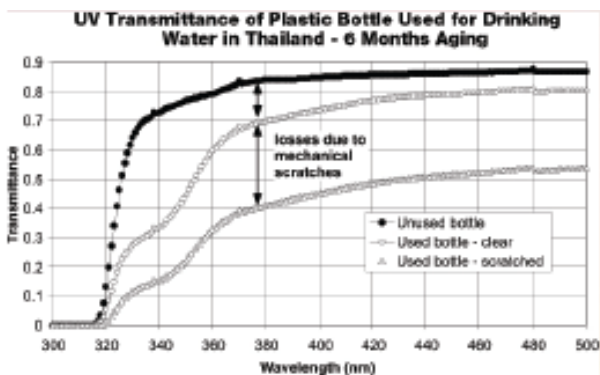


Figura 10. Pérdida de transmitancia por daño mecánico.

Fuente: Wegelin et al., 2001

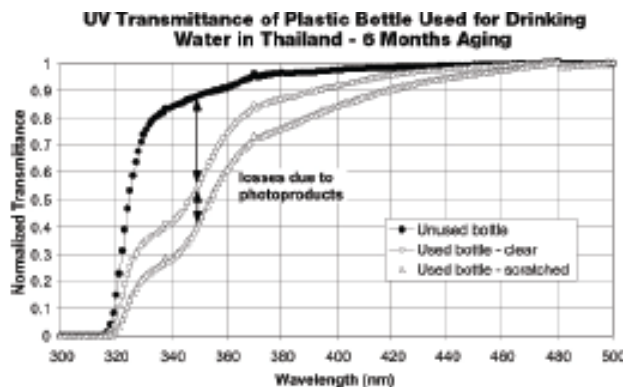


Figura 11. Pérdida de transmitancia por fotoproductos.

En lo que se refiere a potenciales riesgos a la salud por la liberación de aditivos y la formación de fotoproductos, los aditivos están compuestos por moléculas grandes que difícilmente migran a través del material PET. Las pruebas de laboratorio y campo demuestran que los fotoproductos se generan en la superficie externa de las botellas; no se ha observado la migración hacia el agua (Wegelin, 2001). En otro estudio realizado a botellas de PET provenientes de diferentes partes del mundo y que fueron evaluadas para riesgos carcinogénicos por la migración de compuestos orgánicos del PET (Kohler, 2003), mostraron que los niveles de los plastificadores di(2-etilhexil)adipato (DEHA) y di(2-etilhexil)phatalo (DEHP) estuvieron por debajo de las guías de la OMS para calidad del agua potable por lo que la exposición permanente a los niveles encontrados no representan riesgo a la salud.

5.5 PARÁMETROS FISICOQUÍMICOS DEL AGUA DE IMPORTANCIA EN LA DESINFECCIÓN SOLAR

La turbiedad es un parámetro para caracterizar las propiedades ópticas de líquidos que contienen absorbentes y dispersores, por ejemplo, partículas suspendidas. Las partículas suspendidas en el agua reducen la penetración de la radiación solar y protegen a los microorganismos de ésta, por lo que la turbiedad no debe ser mayor a 30 UTN (Wegelin *et al.*, 1994), de lo contrario, se debe filtrar el agua, ó alcanzar temperaturas altas $>50^{\circ}\text{C}$ por un prolongado periodo de tiempo para inactivar los microorganismos.

El contenido de materia orgánica natural (MON), que es un constituyente natural en el agua, le confiere color y actúa como un filtro óptico, disminuyendo la transmitancia de la radiación hacia el agua por lo que su valor no debe ser mayor a 20 UPt-Co. Otro parámetro que incide en el desempeño de la desinfección solar es el contenido de oxígeno en el agua, ya que se ha demostrado que en agua con alto contenido de oxígeno, la luz del sol produce formas de oxígeno altamente reactivas (radicales libres y peróxidos de hidrógeno). Se recomienda que se agiten las botellas antes de iniciar el proceso de desinfección solar (Khaengraeng *et al.*, 2005).

Los parámetros de calidad del agua que influyen en la sobrevivencia de los microorganismos y por tanto modifican el efecto de inactivación de la luz solar son principalmente: nutrientes orgánicos e inorgánicos (particularmente el fósforo y nitrógeno), predadores, bacteriófagos, toxinas bacterianas y adherencia a superficies, incluyendo las partículas suspendidas que protegen a los microorganismos de la radiación solar (Mietinnen *et al.*, 1997; Reche *et al.*, 1998).

5.6 CINÉTICA DE DESINFECCIÓN SOLAR

La cinética de inactivación microbiana por UV sigue un comportamiento de decaimiento exponencial, conocido como la ley de Chick (Wright, s/f; Gray, 1999; Wegelin, 1994; Berney *et al.*, 2006; Dejung *et al.*, 2007; Acra, 1990). La inactivación de los microorganismos como función de la intensidad, se asume que cumple con una cinética de primer orden. Esta relación exponencial no siempre se observa a lo largo de todo el tratamiento (Gaudy, 1980), sin embargo puede aproximarse mediante la siguiente ecuación:

$$\frac{N}{N_0} = e^{-kIT} \quad (1)$$

Donde N es la densidad bacteriana después del tratamiento (UFC/ml, ó NMP/100ml del efluente), N_0 es la densidad inicial de bacterias (UFC/ml, ó NMP/100ml del influente), N/N_0 es la tasa de sobrevivencia bacteriana, K es la constante de la tasa de inactivación ($\text{cm}^2/\mu\text{W min}$), I es la intensidad de la radiación UV-A recibida ($\mu\text{W}/\text{cm}^2$), T es el tiempo de exposición a la radiación UV-A (min). El término $I \times T$ se denomina también fluencia F ó dosis UV.

Las unidades para I , T y K pueden substituirse con W/m^2 , horas y $\text{m}^2/\text{W h}$, respectivamente. El valor adimensional de la constante es una medida directa de la sensibilidad bacteriana a la radiación solar UV-A. El valor experimental de K para cada organismo de prueba puede calcularse de la ecuación 1 y está representada por la pendiente de la correspondiente curva de sobrevivencia.

Sin embargo, como ya se mencionó, en las cinéticas de inactivación microbiológica, a menudo se observan desviaciones de la linealidad de la ley de Chick, ya sea en forma cóncava, también llamadas de “hombros”, las cuales son comunes a cepas puras de laboratorio e irradiación con luz solar. Otro tipo de curva es la convexa, también llamada de “colas” se obtiene con poblaciones mixtas, donde se supone que cada microorganismo tienen un decaimiento exponencial distinto (Figura 12). Los hombros a dosis bajas pueden explicarse usando la cinética de inactivación de eventos en series. En cinética de eventos en series, la inactivación de un microorganismo se produce sólo después que haya ocurrido daño significativo dentro éste. En concordancia con lo anterior, el inicio de la inactivación (observada con una curva de dosis-respuesta) requiere una dosis umbral. No todos los microbios demuestran cinética observable de eventos en serie en sus curvas dosis-respuesta. Chang *et al.* (1985) observaron inactivación viral y la inactivación de algunos patógenos bacterianos siguiendo la ley Chick mientras que la inactivación de quistes, esporas y otras bacterias tenían “hombros”.

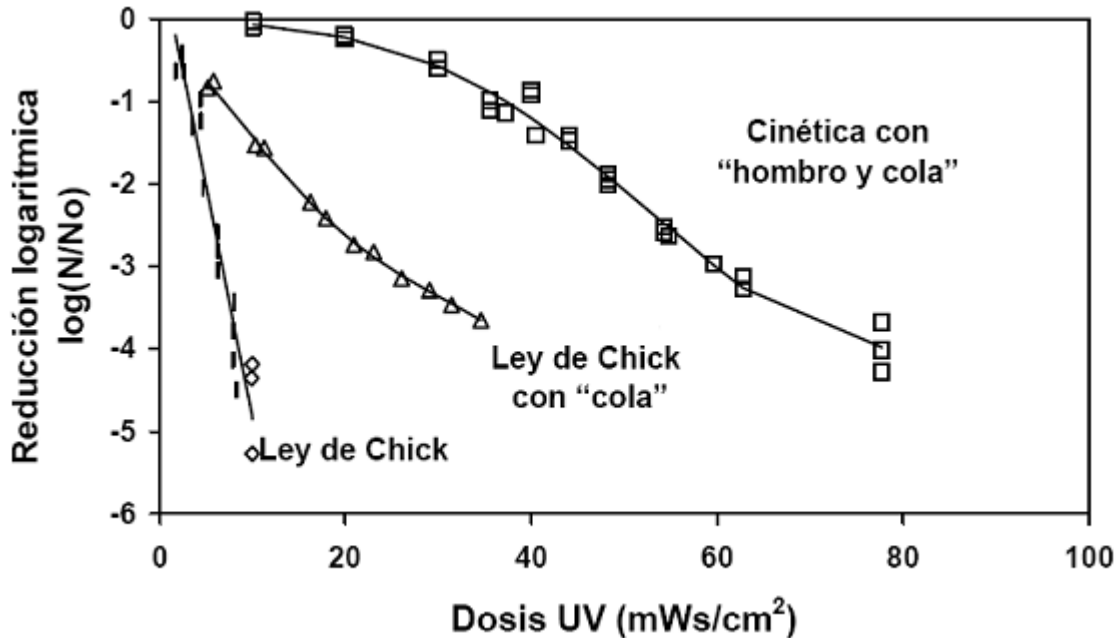


Figura 12. Cinética de inactivación de la desinfección por UV

Fuente: Wright (sin fecha)

Wright (sin fecha) menciona que las colas ocurren a dosis altas y pueden atribuirse a la acumulación de microorganismos y la oclusión de éstos dentro de particulados y otros microorganismos. Los microorganismos absorbidos por material particulado reciben una dosis UV más baja comparada con microbios individuales en la fase acuosa debido a la absorbancia del material particulado y a la biomasa. La transmisión UV a través del particulado dependerá de la composición de éste y de la presencia de compuestos que absorben UV como el hierro. Wegelin (1994), reporta que la forma convexa de las curvas de inactivación, indican envejecimiento de la mezcla de bacterias, por lo que primero se inactivan a una constante de velocidad más alta las bacterias más sensibles, seguidas de las bacterias menos sensibles, a una tasa de inactivación más lenta.

Otra forma de representar las curvas de inactivación, es mediante la tasa de sobrevivencia de bacterias (N/N_0) expresada en términos de porcentaje, por lo que la ecuación 1 cambia:

$$S = (100)e^{-KIT} \quad (2)$$

Donde S es el porcentaje de bacterias sobrevivientes, los demás términos son los mismos que en la ecuación 1.

Substituyendo F por IT la ecuación 2 queda:

$$S = (100)e^{-KF} \quad (3)$$

Las unidades y los símbolos son los mismos de la ecuación 1 y 2. Las curvas de sobrevivencia son gráficas de los valores medios obtenidos de los experimentos para el porcentaje de sobrevivencia (S), como una función exponencial de la intensidad solar UV-A (I) ó fluencia (F). Los valores calculados se derivan de las ecuaciones 2 ó 3.

Para calcular las constantes de inactivación a partir de la ecuación 1, se obtiene su forma logarítmica:

$$\text{Log } N = \log N_0 - kt \cdot \log e = \log N_0 - kF \cdot \log e \dots\dots\dots(4)$$

Las curvas de inactivación que se desvían del comportamiento lineal y presentan al inicio una forma cóncava, también llamada hombro (Figura 13), se pueden ajustar con el siguiente modelo (Wegelin, 1994):

$$N = N_0[1 - (1 - \exp(-kt))^m] = N_0[1 - \exp(-kF)]^m \dots\dots\dots(5)$$

En esta ecuación, m corresponde al número de objetivos, es decir, al número de microorganismos de prueba. La parte cóncava en este tipo de curvas se caracteriza por requerir un tiempo umbral t_s ó fluencia F_s que se obtiene con las ecuaciones:

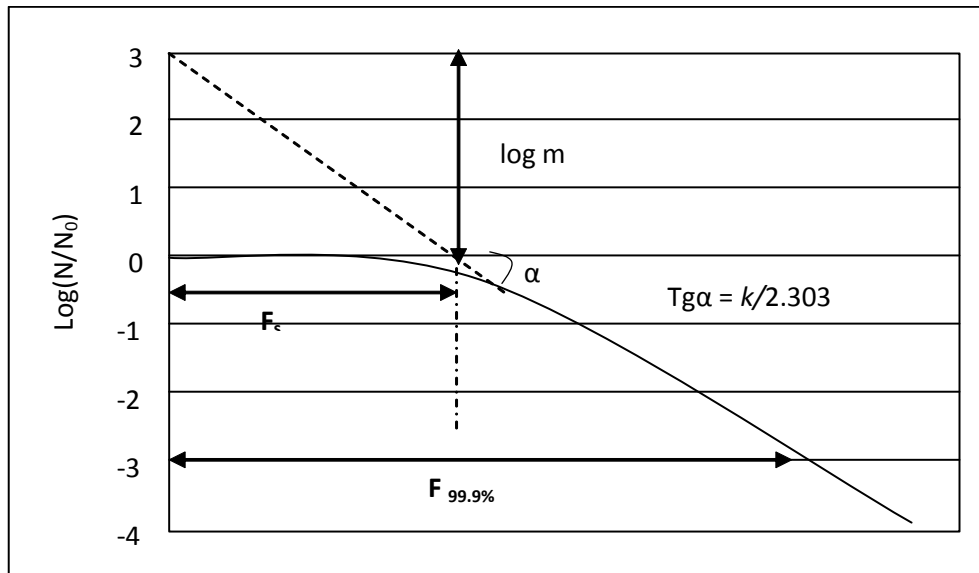


Figura 13. Curva de inactivación "hombro-log lineal".
Fuente: Wegelin *et al.*, 1994

$$t_s = \log m / (k \log e), F_s = \log m / (k \log e) \dots\dots\dots(6)$$

Para caracterizar la sensibilidad a la radiación solar de un sistema microbiológico dado, se calcula el parámetro $F_{99.9\%}$ (Berney *et al.*, 2006; Wegelin *et al.*, 1994), el cual es la fluencia que se requiere para inactivar al 99.9% de la población inicial. Para una función exponencial representada por la ecuación 1, la relación es:

$$F_{99.9\%} = 3 / (k \log e),$$

5.7 ESTUDIOS DE CAMPO

Conroy *et al.* (1996), realizaron un estudio de intervención en una aldea Massai. Distribuyeron botellas de plástico a 206 niños en edades de 5 a 16 años, cuya agua

de bebida estaba contaminada con coliformes fecales. Instruyeron a los niños sobre como llenar las botellas con agua y exponerlas al sol, o conservar las botellas llenas en el interior de la casa. El resultado mostró que el tratamiento solar del agua de consumo se asoció con reducción en el número de episodios de diarrea por niño.

Los mismos autores, en 1999, reportan que en 349 niños Massai menores de 6 años se realizó una evaluación en la cual, algunos niños ingerirían agua desinfectada mediante energía solar y el grupo control ingeriría el agua conservada en el interior del hogar. En los niños que bebieron agua desinfectada, la incidencia de enfermedades diarreicas severas, fue 48.8% contra 58.1% en los controles, en un período de dos semanas.

Aunque la diferencia no es alta, ésta se mantuvo durante el período de seguimiento, lo que confirma que la desinfección solar es un método que mejora la calidad del agua y que la comunidad debe participar activamente.

6 METODOLOGÍA

Los experimentos se llevaron a cabo en tres fases, la primera tuvo como objetivos determinar las cinéticas de inactivación bajo diferentes condiciones de prueba, analizar el efecto de la radiación y la temperatura en la inactivación de los microorganismos de prueba y evaluar si los indicadores actuales son adecuados para representar la inactivación de los microorganismos patógenos al aplicar la desinfección solar. En la segunda fase, se realizaron pruebas de recrecimiento para establecer las condiciones para el almacenamiento del agua desinfectada; en la tercera fase, se realizaron pruebas en la comunidad para evaluar la desinfección solar bajo condiciones reales de operación.

El esquema general para realizar las pruebas fue el siguiente:



6.1 PREPARACIÓN DE CEPAS PARA LAS PRUEBAS

Para las curvas de decaimiento y recrecimiento bacteriano en el laboratorio, se utilizó el efluente de la planta de tratamiento de las aguas residuales del IMTA para medir bacterias heterótrofas, coliformes totales, *Escherichia coli* y enterobacterias. Para *V. cholerae* O1 y *Salmonella* (enterobacteria patógena), se preparó agua de la llave estéril, agregando suspensiones con concentraciones conocidas de cada especie de bacteria.

Cepa pura de *Vibrio cholerae* O1 Inaba

Se prepararon 3 frascos lecheros con 20 ml de caldo infusión cerebro-corazón (BHI, por sus siglas en inglés) y 2% de cloruro de sodio (NaCl), se sembraron 3 asadas de *Vibrio cholerae* O1 Inaba ATCC 14033, se incubaron 24 h en cámara húmeda con agitación a 35 °C. Posteriormente, se repitió el procedimiento para asegurar la total recuperación de las cepas. Se tomó una asada de los frascos y se sembraron en agar soya tripticaseína para proliferación y se incubaron 24 h a 35 °C.

Cepa pura de *Salmonella arizonae* y *Salmonella typhi*

Se prepararon 3 frascos lecheros con 20 ml de caldo nutritivo, se sembraron 3 asadas de *Salmonella arizonae* y *Salmonella typhi*, se incubaron 24 h en cámara húmeda con agitación a 35 °C. Se repite el procedimiento para la recuperación total de las cepas.

Se tomó una asada del frasco y se sembró en agar soya tripticaseína para proliferar las cepas, se incubaron 24 h a 35 °C.

Suspensiones bacterianas para *Vibrio cholerae* y *Salmonella* spp.

En un tubo de ensaye con 10 ml de agua de dilución, se pasaron cepas por asada de las cajas con agar soya tripticaseína hasta alcanzar una concentración 10^9 en la escala de McFarland, este tubo se pasa a un litro de agua de la llave estéril para tener una concentración final de 10^6 NMP/100 ml.

6.2 PROCEDIMIENTOS DE CUANTIFICACIÓN DE BACTERIAS

Determinación simultánea de coliformes totales y *Escherichia coli*

Los coliformes totales y *Escherichia coli* se cuantificaron como Número Más Probable (NMP) por la técnica de sustrato cromogénico/fluorogénico específico. Esta prueba se basa en la capacidad que tienen los organismos coliformes para producir la enzima β -galactosidasa, la cual rompe el sustrato O-nitrofenil- β -d-galactopiranosido (ONPG) produciendo una coloración amarilla por la liberación del O-nitrofenil. Por otra parte, *Escherichia coli* posee la enzima β -glucoronidasa que produce una sustancia fluorescente cuando hidroliza al 4-metilumbeliferyl- β -d-glucoronido (MUG). Esta combinación de sustancias permite la detección de coliformes totales y *Escherichia coli* en 24 horas.

Para sembrar, a 100 ml de muestra se le añade una cápsula de reactivo Colilert, se homogeneiza y se vierte en una placa Quanta-Tray 2000 previamente identificada y etiquetada. Posteriormente, se pasa por el sellador y se incuba 24 horas a 35 °C. Si es necesario se hacen diluciones seriadas de las muestras, en condiciones asépticas con agua estéril (puede ser buffer de fosfatos o de la llave).

Al término del período de incubación, se examinan las placas y se toman como positivos para coliformes totales los cuadros grandes y pequeños que presentan coloración amarilla. La concentración de *Escherichia coli* se obtiene contando los cuadros grandes y pequeños que presenten fluorescencia, para esto se utiliza una lámpara de UV de 6 watts. La densidad de coliformes se expresa como NMP por 100 ml, se obtiene de la tabla de resultados IDEXX Quanta-Tray/2000 NMP al buscar el valor que corresponde al número de cuadros grandes y pequeños positivos, dichos valores presentan un límite de confianza del 95%.

Cuenta heterotrófica (cuenta total de bacterias)

Se siembran por vertido en placa 0.5 ml de la muestra o una muestra diluida, en agar cuenta estándar, tratando de que el número de colonias se encuentre entre 80 y 300. La muestra se distribuye uniformemente en la superficie del agar, cuidando que éste no se rompa y se incuban 24 h a 35 °C.

Cálculos:

$$\text{UFC/ml} = (\text{No. Colonias} * 2) * \text{dilución}$$

Identificación de enterobacterias mediante la técnica miniaturizada API20E

El sistema API-20E consiste de una tira reactiva de microtubos de material plástico, que contiene medios de cultivo deshidratados en los que se llevan a cabo 20 reacciones bioquímicas y seis pruebas complementarias (Fig. 14).



Figura 14. Tiras reactivas con las respuestas típicas de enterobacterias

La hidratación de los medios ocurre al inocular los microtubos con una suspensión que contiene una densidad de 10^6 bacterias para obtener los metabolitos que resultan de la utilización de los substratos a $35\text{ }^\circ\text{C}$ dentro de las 18 a 24 horas de incubación. Los metabolitos permiten la identificación de las diferentes especies de enterobacterias u otros bacilos Gram negativos no exigentes, por cambios de coloración, que en algunos microtubos se desarrollan mediante la adición de reactivos después del período de incubación.

Para el presente estudio, el procedimiento consistió en inocular 0.5 ml de muestra por vertido en agar cuenta estándar, en soya tripticaseína y en agar sulfito bismuto, distribuyendo uniformemente en la superficie de la placa. Las cajas se incubaron durante 18-24 horas a $35\text{ }^\circ\text{C}$. Posteriormente, se seleccionaron colonias bien aisladas y de características morfológicas diferentes, como son por ejemplo el color, tamaño, forma, consistencia (mucoides, cremosas, rugosas) y se proliferaron en agar soya tripticasa incubando 24 horas a $35\text{ }^\circ\text{C}$.

Se prepara una suspensión bacteriana, tomando con un palillo estéril el centro de una o más colonias de la caja de agar soya tripticasa y se deposita (n) en el medio de suspensión estéril, hasta obtener aproximadamente 300×10^6 bacterias/ml, de acuerdo con la escala de McFarland.

Una vez preparada la suspensión, con pipetas Pasteur se inocular cada uno de los microtubos de la tira reactiva, de acuerdo con las instrucciones del fabricante. Los períodos de incubación para la lectura de las 23 reacciones bioquímicas se realizaron de acuerdo con las instrucciones del fabricante.

Cuantificación para *Vibrio cholerae* y *Salmonella*

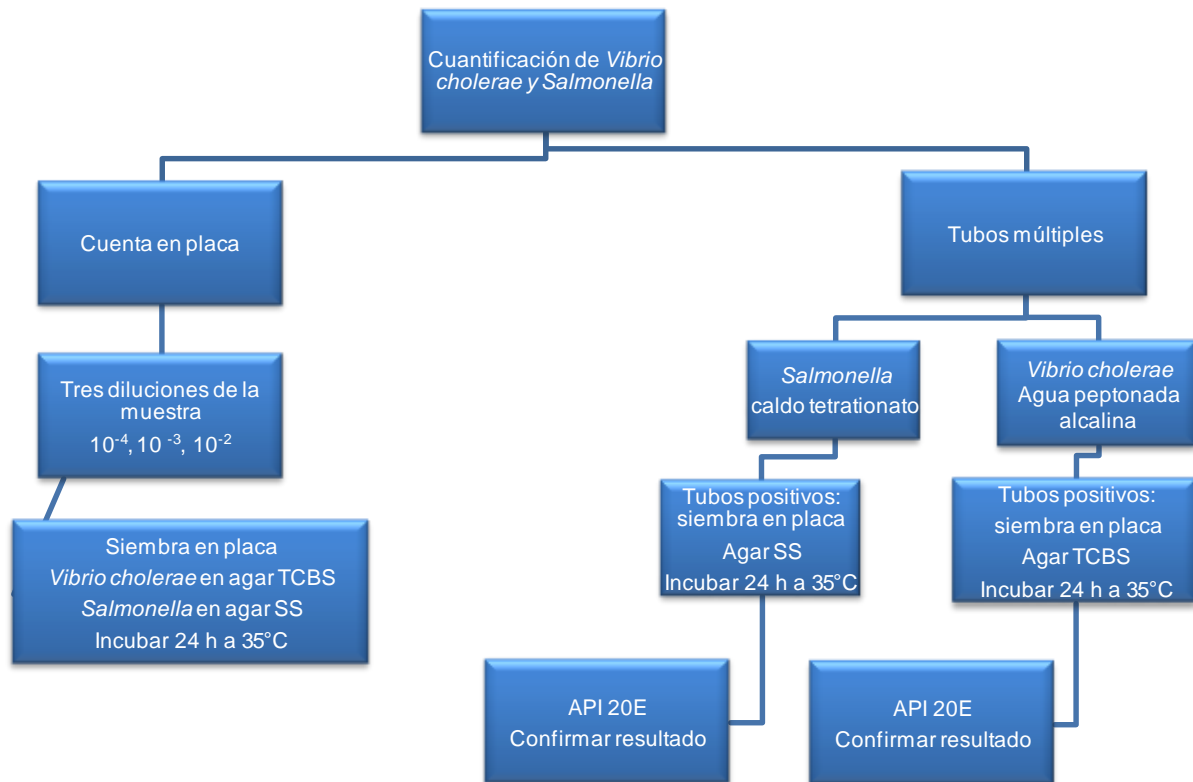
Inicialmente se realizó la cuantificación en placa, sin embargo, debido a las diferencias que se detectaron en los conteos por la utilización bacteriana de los substratos, las pruebas se realizaron mediante la técnica de tubos múltiples, que incluyó enriquecimiento de la muestra y aislamiento en medios de cultivo diferenciales y selectivos.

Los resultados se confirmaron con el sistema API-20E y se reportaron como Número Más Probable por 100 ml (NMP/100 ml).

Cálculos:

$$\text{NMP/100 ml} = \frac{(\text{Número de tubos positivos}) \times 100}{(\text{ml de muestra en tubos negativos}) (\text{ml de muestra total})}$$

El esquema para la cuantificación fue el siguiente:



Aislamiento de enterobacterias

Este procedimiento se llevó a cabo para caracterizar la fuente de abastecimiento de agua en la comunidad. Como los microorganismos pueden encontrarse muy estresados por factores tales como las bajas temperaturas e inanición, para mejorar la sensibilidad en la detección de enterobacterias, se llevó a cabo un preenriquecimiento con caldo nutritivo (18 a 24 horas de incubación a 37 °C). Este medio de cultivo no contiene inhibidores y lo que se hizo fue favorecer la proliferación de toda la flora presente y posteriormente se procedió de manera normal como se muestra en el siguiente esquema.

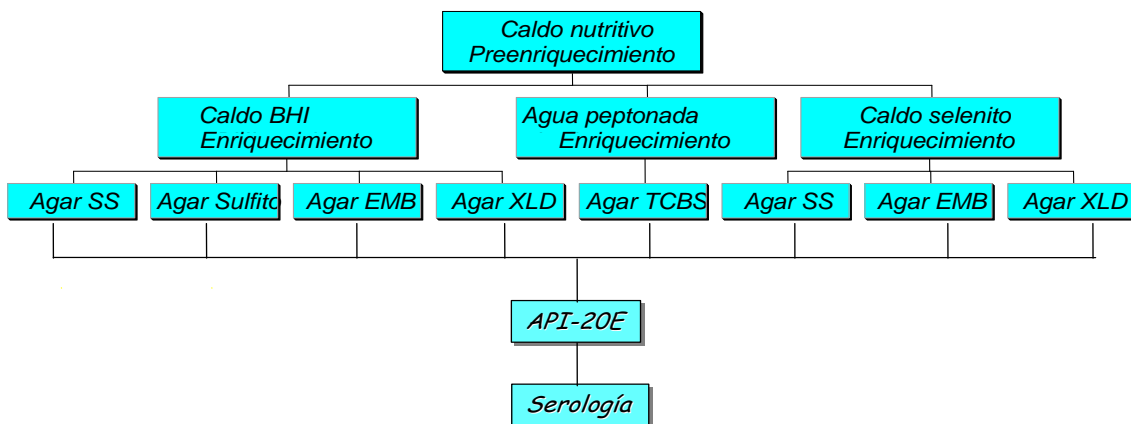


Tabla 12. Composición de los medios de cultivo para detectar diferentes bacterias mesofílicas aerobias y enterobacterias

Medio de cultivo (en placa)	Fuentes			Inhibidores indicadores específicos
	Carbono	Nitrógeno	Electrolitos	
Cuenta estándar	Dextrosa	Peptona de caseína y extracto de levadura	No	No
Sulfito de bismuto	Extracto de carne, peptona y dextrosa	Extracto de carne y peptona	Fosfatos, sulfatos, hierro y sulfito de bismuto	Sulfito de bismuto/ Verde brillante
Soya tripticasa	Triptona, caseína, soytona, soya y dextrosa	Triptona, caseína, soytona y soya	Cloruros, fosfatos, sodio y potasio	No
TCBS Tosulfato-Citrato-Bilis-Sacarosa	Extracto de levadura, proteosa-peptona, citrato sacarosa	Extracto de levadura, proteosa-peptona,	Cloruros, hierro, sodio, tiosulfato	Oxgall/ azul de bromotimol y azul de timol
Xilosa-lactosa-dextrosa	Extracto de levadura, xilosa, lactosa, sacarosa y citrato	Extracto de levadura, lisina y amonio	Cloruros, sodio, tiosulfato y hierro	Desoxicolato de sodio/rojo de fenol
SS	Extracto de carne, proteosa-peptona, lactosa, citrato	Extracto de carne, proteosa-peptona	Sodio, tiosulfato y hierro	Sales biliares

Fuente: Richardson (ed.). 1985. Standard methods for the examination of dairy products, 15th ed. APHA. Washington, D.C.

6.3 DESCRIPCIÓN DEL CONCENTRADOR SOLAR DEL IMTA

Se utilizó el concentrador solar proporcionado por el IMTA. Este concentrador fue diseñado tomando dos consideraciones (Martín *et al.*, 1999): La primera fue que la base debía ser cuadrada y contener a lo largo una botella de plástico de dos litros de capacidad. Esto fijó un cuadrado de 35 cm x 35 cm que permite tener tres botellas en su interior. La segunda es que los paneles fueran cuadrados para alcanzar una concentración de tres veces la radiación solar (Fig. 15).

Tiene un ángulo de apertura de 30°, que resultó de las ecuaciones para el cálculo de la concentración solar (C) y el área efectiva de la apertura del concentrador (A_e), que definen este tipo de colectores (Martin *et al.*, sin fecha):

$$C = \frac{A_e}{A_c} \quad \dots\dots (7) \qquad A_e = W^2 + 4WL \sin \gamma \quad \dots\dots (8)$$

donde: A_c es el área de la base del colector, W es el largo y ancho de éste, L es la longitud de las aletas y γ es el ángulo de apertura de las aletas con respecto a la normal al área de la base A_c .

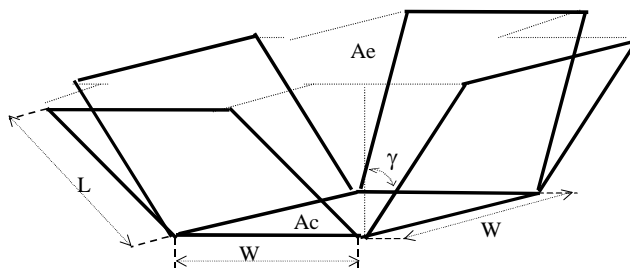


Figura 15. Concentrador diseñado por el IMTA (Martin *et al.*, 2001)

Los prototipos para comunidades rurales se construyeron con madera de desecho y se recubrieron con papel aluminio comercial (Figura 16). Cada concentrador cuenta con dos clavos largos situados cada uno en esquinas subyacentes que permiten, por un juego de sombras, posicionar los concentradores en la dirección correcta del sol. Estos concentradores se inclinaron utilizando piedras o pedazos de madera, simulando las condiciones en las que se haría en las comunidades rurales.



Figura 16. Concentrador solar para comunidades rurales.

Las reflectancias medidas para los espejos y el plástico aluminizado, así como la transmitancia de las botellas PET, para el rango de 350 a 1150 nm es de 77.45%, 66.54% y 85.81% respectivamente (Figura. 17).

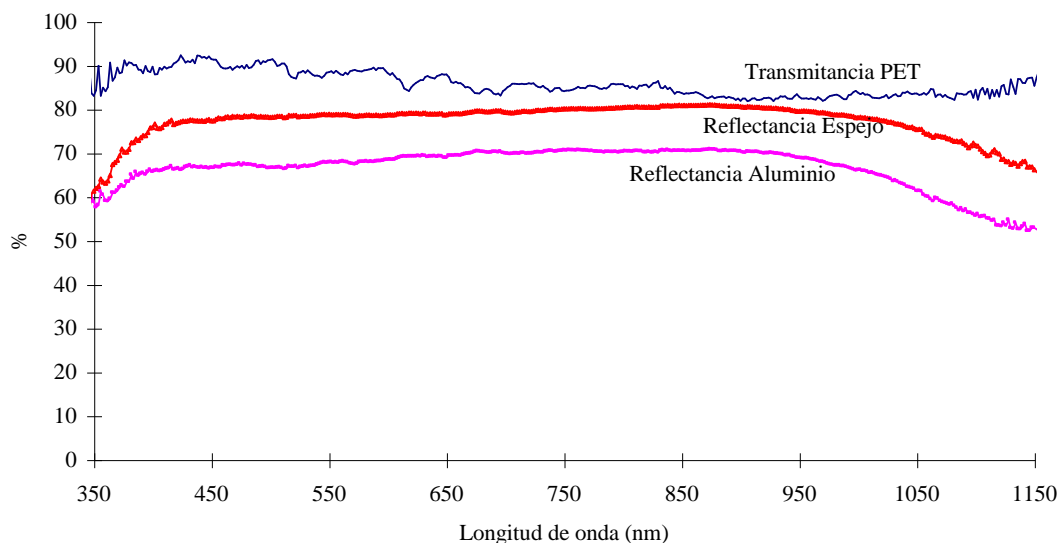


Figura 17. Reflectancia y transmitancia de los materiales utilizados.

Fuente: Martin *et al.*, 2001

6.4 CINÉTICAS DE INACTIVACIÓN MICROBIANA

Para analizar el efecto de la radiación y temperatura se expusieron tres botellas de PET en el concentrador solar:

- 1 botella transparente para evaluar el efecto de la radiación
- 1 botella ½ pintada de negro para evaluar el efecto combinado de la radiación y la temperatura
- 1 botella negra para evaluar el efecto de la temperatura
- En todas las pruebas se mantuvo un testigo en la obscuridad a temperatura ambiente.

Se registraron los siguientes datos para cada microorganismo:

Tabla 13. Registro de datos para cada microorganismo de prueba.

t (hr)	I (W/m ²)	F (W.h/m ²)	Transp. N ¹	T (°C)	½ Negra N ¹	T (°C)	Negra N ¹	T (°C)	Testigo N ¹
0.00	0	0	8000	25	8000	25	8000	25	8000
0.25	779	195	3090	29	3818	31	5000	30	
0.50	801	200	818	32	1818	35	3545	35	
0.75	843	211	545	36	636	42	3818	41	
1.00	878	220	0	40	600	48	3363	47	4000
1.50	898	449		46	26	58	1300	56	
2.00	909	455		52	0	66	87	62	3090
2.50	935	467		55		72	0	67	3636
4.00	886	1329		60		76		75	2636
Rad. Acum.		3525							

N¹ = Número de microorganismos en el tiempo t; I= intensidad de radiación solar; F = Fluencia ó dosis de radiación solar; T= temperatura; Transp.= PET transparente; ½ negra= PET pintado a la mitad de negro; Testigo= PET pintado de negro almacenado en la obscuridad.

- El tiempo de exposición varió de 2 a 5 horas dependiendo si el día era soleado o nublado.
- Se tomaron muestras cada 15 minutos las dos primeras horas y posteriormente cada 30 minutos. Al tomar la muestra se registró la temperatura.
- Con los datos de radiación solar registrados por la Estación Meteorológica (EMA) del IMTA y el tiempo de exposición, se calculó la dosis de radiación solar, también conocida como fluencia (F), $I \times T = F$ (W.h/m²).
- Las muestras se tomaron en bolsas estériles y se almacenaron a 4°C por no más de 24 horas para realizar el análisis correspondiente.

6.4.1 Cálculo de las cinéticas de inactivación

Con los datos de inactivación, se graficó la sobrevivencia (N_t/N_0) en función de la dosis de radiación (F). Para ajustar las curvas de inactivación se utilizó el programa “Herramienta para ajustar modelos de inactivación Geeraerd and Van Impe (GInaFiT V.1.5)” (Geeraerd *et al.*, 2005), esta herramienta se ha utilizado en diversos estudios sobre radiación solar para ajustar las curvas y obtener la constante de inactivación

k. (Geeraerd *et al.*, 2000; Berney *et al.*, 2006a y 2006b; Sichel *et al.*, 2007; Boyle *et al.*, 2008).

Con esta aplicación se pueden evaluar diez tipos de modelos de sobrevivencia microbiana, para datos experimentales que relacionan la evolución de la población microbiana con el tiempo e incluye los modelos que representan el proceso de inactivación por radiación solar: regresión lineal y las curvas que presentan una demora (hombro) antes de iniciar el decrecimiento log-lineal y que se describieron en las ecuaciones 1 y 6. Este programa también reporta el siguiente análisis estadístico: errores estándar de los valores parámetro, la Suma de Cuadrados del Error, la (raíz) Media de la Suma de los Cuadrados de los Errores, la regresión (R^2) y la regresión ajustada (Figura 18).

De la curva de inactivación log-lineal se obtiene el valor de la constante de inactivación k ($m^2/W.h$) y para el caso de las curvas que presentan “hombro”, el valor umbral antes del inicio de la inactivación (F_s).

Además, con la finalidad de comparar la sensibilidad de los microorganismos a la radiación solar, se calculó la dosis de radiación requerida para inactivar al 99.9% (3)log de la población bacteriana. Para esto se calcularon los valores de $F_{99.9\%}$ aplicando la ecuación 6. Para el caso de curvas que presentan demora, la hoja de cálculo presenta el valor umbral F_s necesario para iniciar la inactivación.

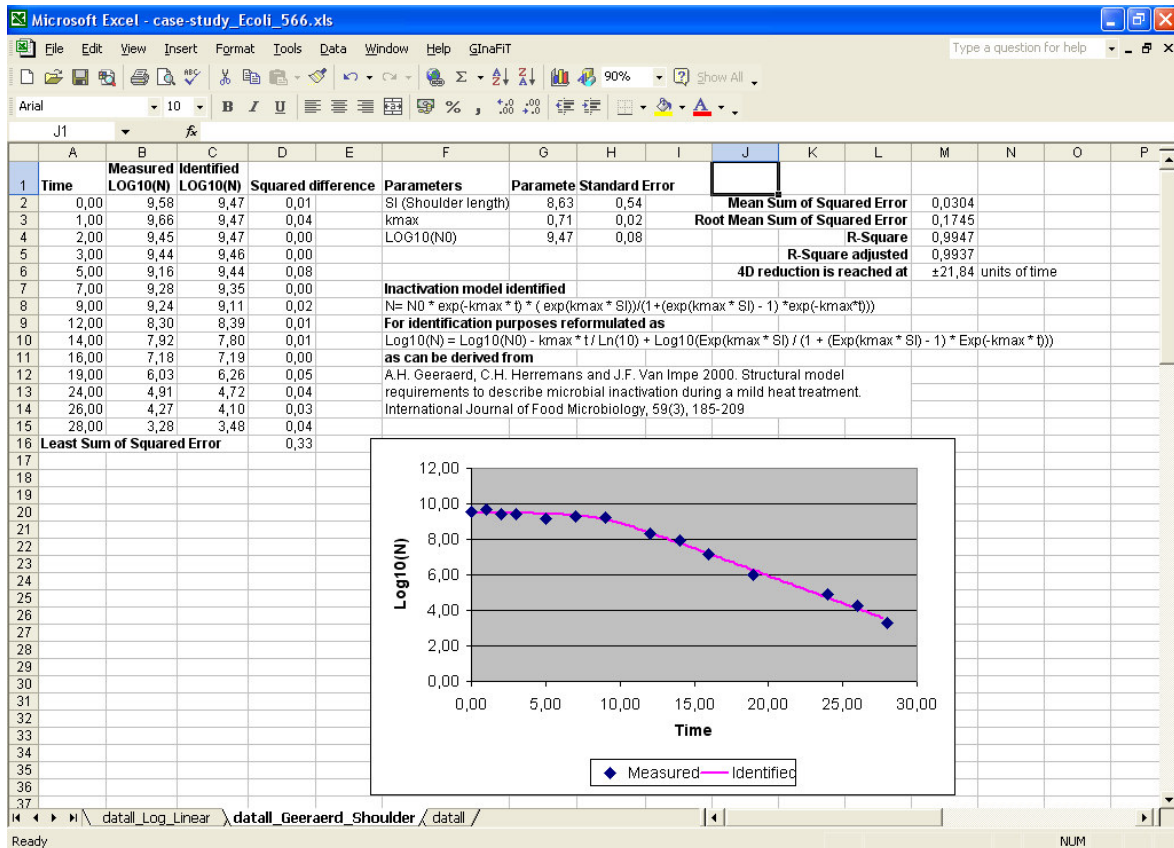


Figura 18. Pantalla de resultados GInaFit.

Fuente: GInaFit v1.5, manual de usuario, 2008.

6.4.2 Evaluación del efecto de la radiación y temperatura.

A partir de las cinéticas que presentaron una mayor tasa de inactivación por efecto de la temperatura, se determinará la contribución a la inactivación de los microorganismos por:

- Muerte natural de los microorganismos
- Efecto de la temperatura
- Efecto de la radiación solar
- Efecto combinado de radiación solar más temperatura

6.5 Evaluación del recrecimiento de bacterias después de la desinfección solar.

Para establecer las condiciones de almacenamiento del agua una vez que ésta ha sido desinfectada mediante radiación solar, se realizó la prueba de recrecimiento para los diferentes microorganismos. En esta prueba se verificó si la radiación y su combinación con la temperatura causan la inactivación total de los microorganismos ó si el daño es parcial y además las bacterias cuentan con mecanismos de reparación del daño por lo que pueden recuperarse durante el almacenamiento. La prueba se realizó con las siguientes características:

Tabla 14. Características de las pruebas de recrecimiento.

Recrecimiento	
Tiempo de exposición	4 horas
Tipo de concentrador	Fijo
Tipo de botella	Transparente, ½ negro, negra
Periodicidad de las mediciones	Cada 6 horas
Determinaciones	Coliformes totales, <i>Escherichia coli</i> , cuenta estándar, Salmonella, Vibrio cholerae O1

6.6 PRUEBAS EN CAMPO

Para verificar los resultados obtenidos en laboratorio, se hicieron pruebas en condiciones reales de operación en una comunidad marginada del estado de Morelos.

6.6.1 Descripción de la comunidad “Los Dormidos”

El método de desinfección solar se aplicó en la comunidad Los Dormidos en Tlaquiltenango, Mor. (Figs. 19-20). Esta comunidad se seleccionó en coordinación con la Jurisdicción Sanitaria No. II, ubicada en Zacatepec. La comunidad se localiza en las coordenadas longitud 99°04'43.00" y latitud 18°36'17.00", se encuentra alejada de la cabecera municipal y los accesos se dificultan en la temporada de lluvias, ya que solamente existe un camino de terracería de 10 km de Tlaltizapán en muy mal estado, de tal manera que se llega a pie, en caballo, burro o mula.

La comunidad está conformada por 14 familias, tienen acceso a educación elemental, un jardín de niños y una escuela primaria, que son atendidos por estudiantes de servicio social. De acuerdo con varias de las mujeres, los problemas de salud más graves son las gripas, problemas respiratorios, dolor de huesos y diarreas.



Figura 19. Localización de la Comunidad de estudio, Los Dormidos.

Fuente: INEGI, Información Referenciada Geoespacialmente Integrada en un Sistema (IRIS V.4.0.1), 2000.

La principal actividad económica es la agricultura de temporal, los principales cultivos son frijol y maíz. Las personas que poseen ganados, no por inversión sino

para mantenimiento y resolver problemas urgentes (enfermedad, muerte, por ejemplo). En la tabla 15 se presentan los indicadores sociodemográficos de la comunidad.

Tabla 15. Indicadores sociodemográficos para los Dormidos

Indicador	Datos
Población total	51
Población masculina	23
Población femenina	28
Población mayor a 15 analfabeta	3
Grado promedio de escolaridad	4.95
Total de viviendas	9
Promedio de ocupantes por vivienda	5.9
Viviendas con agua entubada	0
Viviendas con drenaje	0
Viviendas con sanitario	0
Viviendas con electricidad	0
Población económicamente activa	11
Población ocupada	11
Población ocupada en sector primario	9
Población ocupada en sector secundario	0
Población ocupada en sector terciario	2

Fuente: INEGI, II Censo de Población y Vivienda, 2005.

El agua de abastecimiento es un manantial relativamente protegido (Fig. 21), pues se encuentran excretas de animales alrededor y los recipientes con que se extrae el agua pueden ser una fuente de contaminación. Durante el periodo de visitas, se observó que el manantial había sido saneado, se dice que lo lavan con cepillo o escobas y cloro. No obstante esto, la gente prefiere el agua directa del manantial y rechazan el sabor del cloro. Tampoco les gusta el agua hervida porque consideran que cambia el sabor; por otro lado, se cocina con leña, así que hervir agua puede representar trabajo adicional para las mujeres.

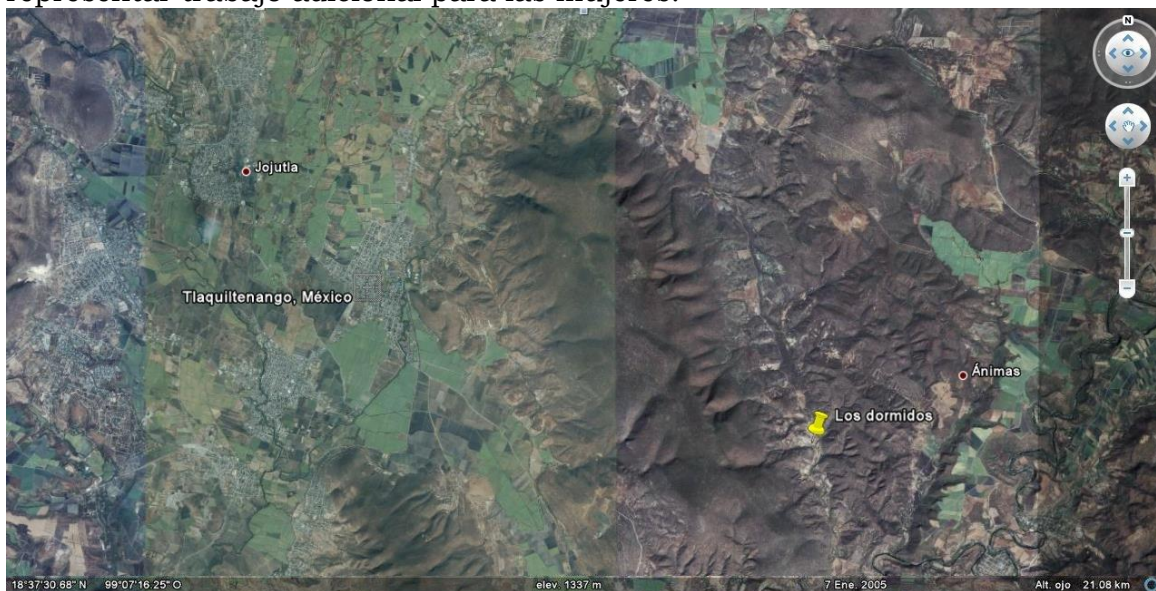


Figura 20. Imagen satelital de la comunidad Los Dormidos.

Fuente: Google Earth V. 4.3, <http://earth.google.es/>

El manantial está conectado a unos tanques a cielo abierto, en donde se lava la ropa y abreven los animales. Como consecuencia de cambios en los niveles de agua, suele haber mezcla y esto puede constituir también un foco de contaminación.



Figura 21. Fuente de abastecimiento de la comunidad Los Dormidos

Las viviendas no se encuentran en buenas condiciones, y se observan excretas de animales en prácticamente todo el terreno. Solamente una vivienda cuenta con letrina y ésta no se ve en las mejores condiciones. La población defeca al aire libre. Parte de la basura la quemar en sus solares, el restante lo tiran a las cañadas, o simplemente se encuentra en el terreno.

Estas características califican a la comunidad con muy alto grado de marginación (CONAPO, 2005) y con acceso básico al agua, que pone en riesgo la higiene y por tanto la salud (WHO, 2006), por lo que se consideró prioritario implementar la desinfección solar y evaluar su desempeño en condiciones reales de aplicación.

6.6.2 Determinación de la calidad bacteriológica del agua de abastecimiento

La muestra para el aislamiento e identificación de enterobacterias, se concentró durante 48 horas en hisopos de Moore estériles, con la finalidad de concentrar a los microorganismos que como todos los patógenos, en el ambiente extraintestinal se encuentran en menor cantidad que las bacterias indicadoras. Los hisopos se transportaron y conservaron en medio Cary Blair, protegidos de la luz y a temperatura ambiente, para no dañar a los microorganismos.

Para el diagnóstico de la presencia de enterobacterias patógenas y potencialmente patógenas, se emplearon diferentes medios de enriquecimiento y aislamiento específicos e identificación mediante la misma prueba miniaturizada API-20E.

6.6.3 Cinética de inactivación con agua de la fuente de abastecimiento de la comunidad.

Se realizó la curva de decaimiento con agua de la fuente de abastecimiento para determinar las cinéticas de inactivación para coliformes totales y fecales. Se utilizó la hoja de cálculo GInaFiT para obtener las constantes de inactivación, también se

calculó la dosis necesaria para eliminar el 99.9% de las bacterias ($F_{99.9\%}$) para poder comparar los resultados con los obtenidos en laboratorio.

6.6.4 Evaluación del efecto de la temperatura y la radiación

Se analizó la contribución de la temperatura y la radiación en la inactivación de los microorganismos y se comparó con los resultados de laboratorio.

6.6.5 Evaluación del recrecimiento en agua desinfectada con radiación solar en la comunidad

Se realizaron tres pruebas con las siguientes condiciones:

Tabla 16. Condiciones controladas para las pruebas de recrecimiento en el agua de la comunidad

	Prueba 1	Prueba 2	Prueba 3
Tiempo de exposición (h)	2.2	4	4
Tipo de concentrador	Fijo	Fijo	Fijo
Tipo de botella	Transparente, ½ negro, negra	Transparente, ½ negro, negra	Transparente, ½ negro, negra
Periodicidad de las mediciones	Cada 24 horas hasta 72 horas	Cada 24 horas hasta 72 horas	Cada 24 horas hasta 132 horas
Determinaciones	Coliformes totales y <i>Escherichia coli</i>	Coliformes totales y <i>Escherichia coli</i>	Coliformes totales y <i>Escherichia coli</i>
Radiación acumulada (W/m²)	Baja	Alta	Alta

6.6.6 Pruebas de desinfección solar realizadas por la población



Se colocaron dos tipos de concentradores:

- El prototipo evaluado en laboratorio, con capacidad para tres botellas
- Un concentrador de 100 x 35 cm con capacidad para ocho botellas (Figura 22)

Participaron seis usuarios (familias) de manera voluntaria; se les capacitó en el manejo del concentrador, el llenado y colocación de las botellas. Se les pidió dejar las botellas durante todo el día. Para la evaluación se realizaron seis visitas y se tomaron muestras para medir la inactivación de coliformes totales y fecales

Figura 22. Concentrador solar para ocho botellas.

7 RESULTADOS

Para la presentación y discusión de los resultados obtenidos, es necesario aclarar que los niveles bacterianos que se probaron en los diferentes experimentos controlados, difícilmente podrán encontrarse en fuentes de abastecimiento subterráneas o superficiales, aunque en los cuerpos de agua superficiales, el tipo y cantidad de microorganismos dependería de su localización y de las aportaciones por escorrentías o descargas.

La finalidad de trabajar niveles tan altos es por un lado evaluar al sistema, y por otro contar en la medida de lo posible con muestras que permitan cuantificar organismos sobrevivientes. La selección de las bacterias de prueba, se basó en varios puntos:

- La literatura reporta que los coliformes totales, coliformes fecales y *Escherichia coli*, son más resistentes que los patógenos a la desinfección, ya sea mediante métodos químicos o físicos, por lo que se asume que su fotoinactivación es una aproximación de los efectos sobre otros enteropatógenos.
- Entre el grupo de bacterias enteropatógenas, *Salmonella* tiene cierta tolerancia a la luz solar, por ejemplo, se requieren 90 minutos para fotoinactivar *Salmonella paratyphi* y 75 para *Escherichia coli*.
- *Vibrio cholerae* O1 es una especie que ha mostrado un amplio rango de estrategias de adaptación a diversos factores ambientales.
- La cuenta de bacterias heterótrofas, es necesaria dado que está constituida por la mezcla de bacterias nativas o autóctonas. Es importante señalar que la composición de medio de cultivo es relativamente sencilla y por esto no necesariamente se relaciona con el contenido de microorganismos de origen fecal.
- La mezcla de enterobacterias, se probó para verificar comportamiento de bacterias patógenas potenciales aisladas del ambiente, con bajo contenido de nutrientes

7.1 CINÉTICA DE INACTIVACIÓN

Las curvas de inactivación bacteriana para Coliformes totales, *Escherichia coli*, *Enterococcus faecalis*, *Samonella typhi*, *Salmonella arizonae* y *Vibrio cholerae* O1 *Inaba*, se realizaron en fechas distintas para obtener información con diferentes condiciones de insolación y temperatura. Los datos de insolación solar corresponden a la radiación global. La temperatura corresponde a la máxima registrada.

A partir de los datos de inactivación se obtuvo la pendiente k , la cual representa la velocidad de reacción; se evaluó el comportamiento de la velocidad por efecto de la temperatura así como de la dosis de radiación requerida F para inactivar al 99.9% de microorganismos ($3\log_{10}$).

7.1.1 Coliformes totales y *Escherichia coli*

En las pruebas, el incremento en la temperatura corresponde a días con mayor insolación (Fig. 23). Las curvas de inactivación obtenidas y ajustadas se presentan en las gráficas 24-27, los resultados de las cinéticas se presentan en la tabla 17. La Figura 28 presenta la comparación entre la dosis requerida para cada tipo de botella. Los datos para la construcción de las curvas se presentan en el anexo 1.

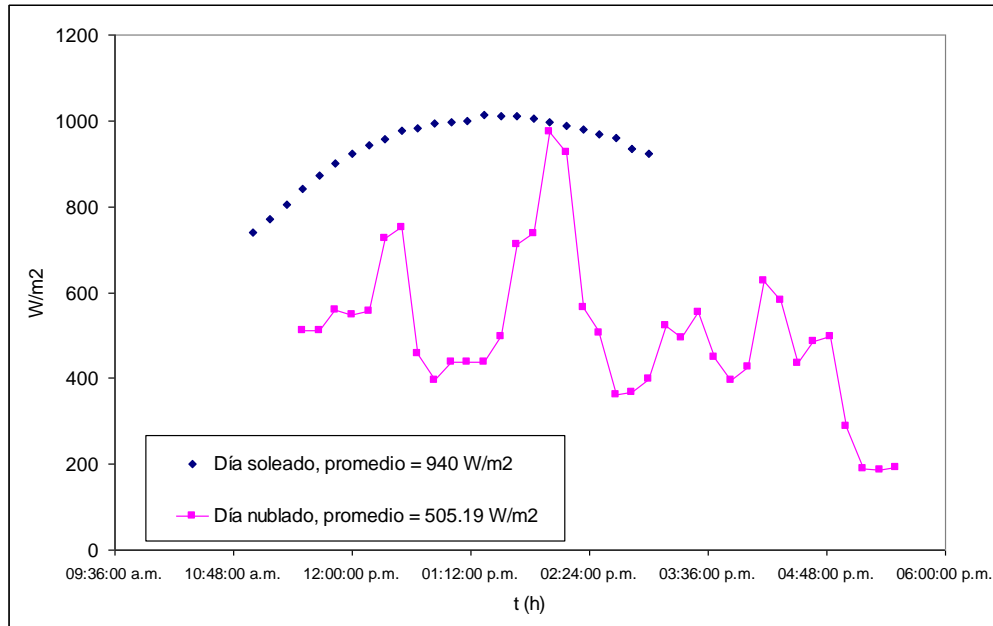


Figura 23. Radiación registrada para coliformes totales.

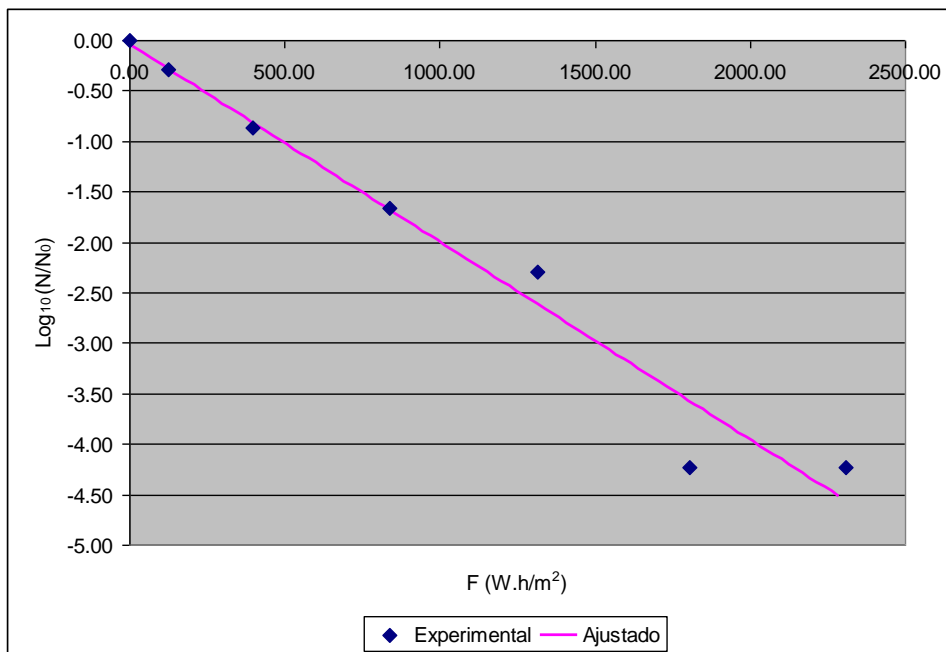


Figura 24. Cinética de inactivación para coliformes totales, PET transparente, T=52°C

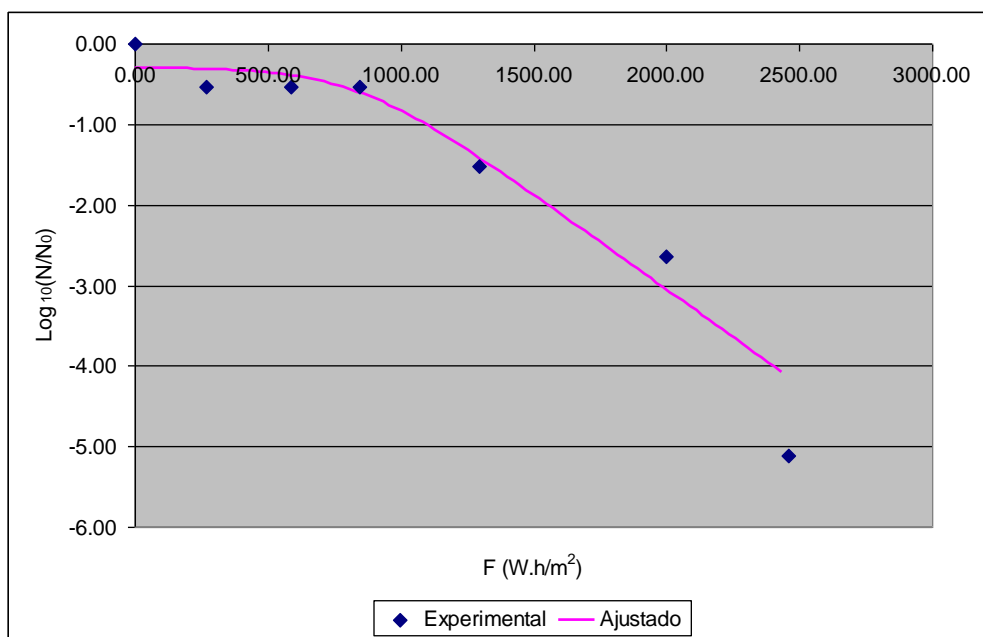


Figura 25. Cinética de inactivación para coliformes totales, PET transparente, T=38°C

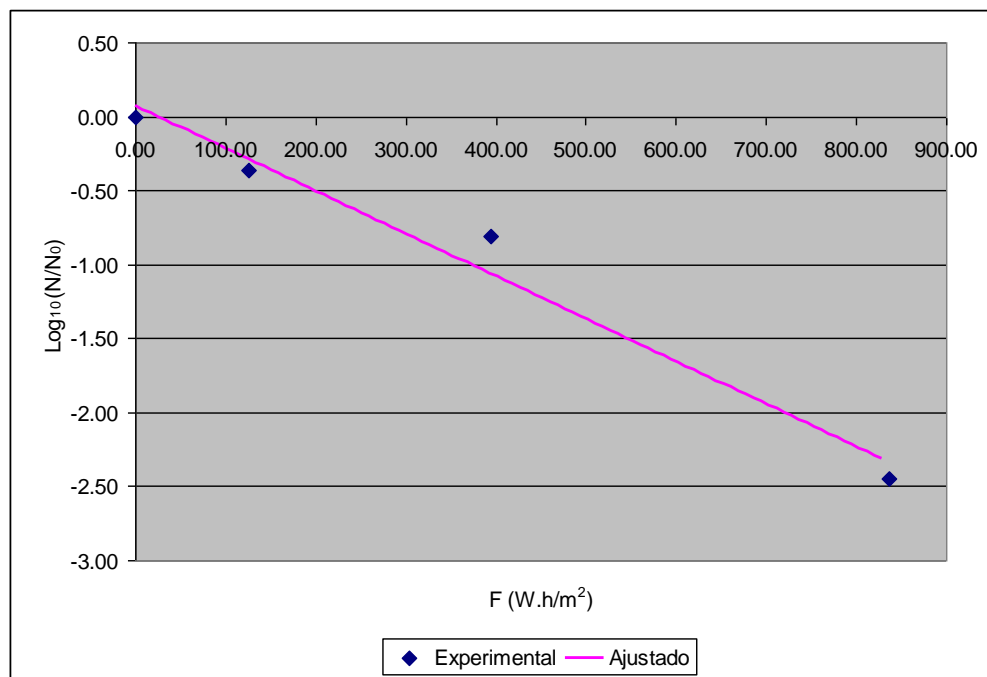


Figura 26. Cinética de inactivación para coliformes totales, PET ½ negro, T=72°C

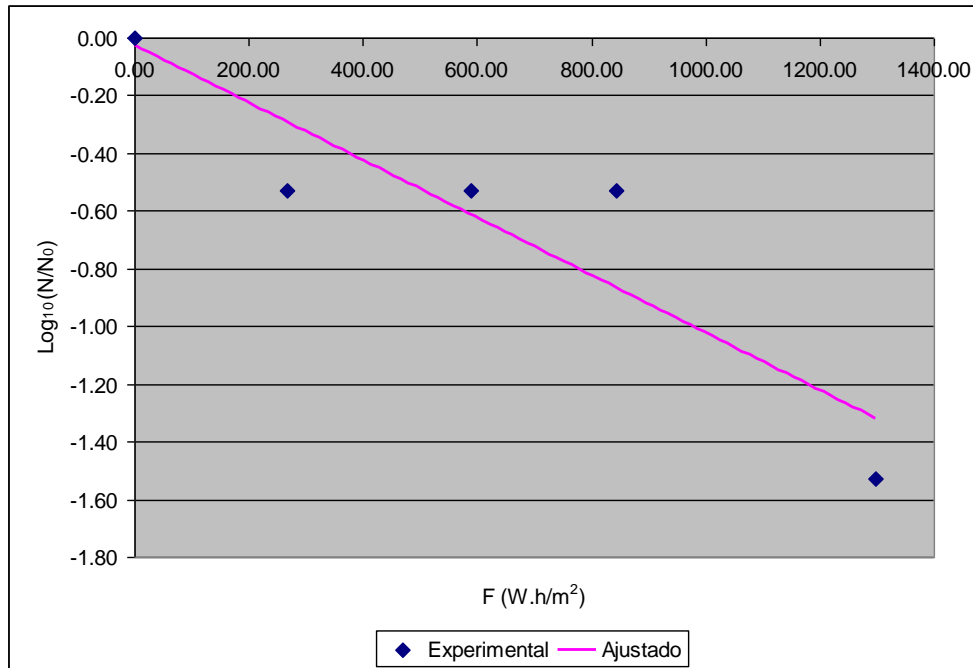


Figura 27. Cinética de inactivación para coliformes totales, PET ½ negro, T=52°C

Las cinéticas de inactivación siguieron un comportamiento de primer orden, con incremento de la velocidad cuando aumentó la temperatura. La velocidad más alta se presentó en el pet ½ negro a 72°C y la más lenta en el mismo tipo de pet a 38°C.

En el pet transparente con temperatura baja (38°C), la cinética sigue un comportamiento hombro-lineal, es decir, se requirió de una dosis de radiación mínima ó umbral F_s para iniciar el proceso de inactivación.

Tabla 17. Cinéticas de inactivación y $F_{99.9\%}$ para coliformes totales.

PET	k (m ² /W.h)	R	F_s (W.h/m ²)	$F_{99.9\%}$ (W.h/m ²)	$F_{99.9\%} + F_s$
Transparente					
T=52°C	0.0045	0.964		1531	
T=38°C	0.0050	0.933	839	1382	2 220
½ Negro					
T=72°C	0.0070	0.974		987	
T=52°C	0.0020	0.905		3454	

k= velocidad de inactivación; R= Coeficiente de regresión; F_s = Dosis umbral (hombro); $F_{99.9\%}$ = Dosis para inactivar 3 log; $F_{99.9\%} + F_s$ = dosis total.

El hecho de que en el pet ½ con 52°C la velocidad de inactivación fuera la más lenta, nos indica que sólo se recomienda utilizar este tipo de botella cuando la radiación solar sea alta y se alcancen temperaturas superiores a los 50°C. Esto se corrobora con el resultado del pet transparente a 38°C, donde se observa que aunque se necesita una dosis umbral para iniciar la inactivación, la dosis total fue menor que con el pet ½ negro a 52°C.

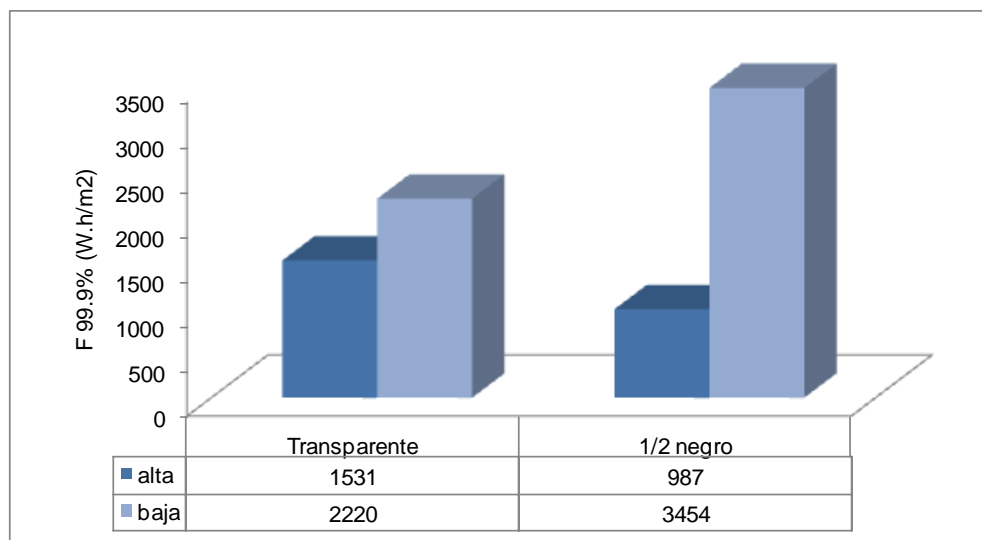


Figura 28. Dosis requerida para inactivar el 99.9% de coliformes totales

La dosis de radiación solar para inactivar 3 log de coliformes en el pet transparente, se redujo 1.5 veces cuando la temperatura fue alta, este efecto es mas marcado en el pet ½ negro en el que la dosis se reduce 3.5 veces con la temperatura mayor.

Con respecto al efecto de la radiación y la combinación de radiación+ temperatura (pet transparente y ½ negro), la dosis requerida disminuye con el efecto combinado cuando la temperatura es de 72°C; sin embargo, esta temperatura sólo es posible alcanzarla en días con insolación alta, mayor a 800 W/m².

Estos resultados muestran que el efecto principal en las cinéticas de inactivación y en la dosis $F_{99.9\%}$, se atribuye a la radiación solar y las botellas pintadas a la mitad de negro mejoran el proceso sólo si la insolación es alta para alcanzar una temperatura mayor a 50°C.

Para *Escherichia coli*, las cinéticas de inactivación también siguieron un comportamiento lineal (Figs. 29-32) y mostraron mayor sensibilidad a la desinfección solar que los coliformes totales como lo demuestran las constantes de inactivación. La velocidad de inactivación es mayor en el pet transparente con la mayor temperatura (tabla 18) y al igual que para coliformes totales, la reacción más lenta fue para el pet ½ negro con la menor temperatura.

También se observa el incremento en la velocidad por efecto de la temperatura en la botella ½ negra cuando ésta es mayor a 50°C (Figura 33).

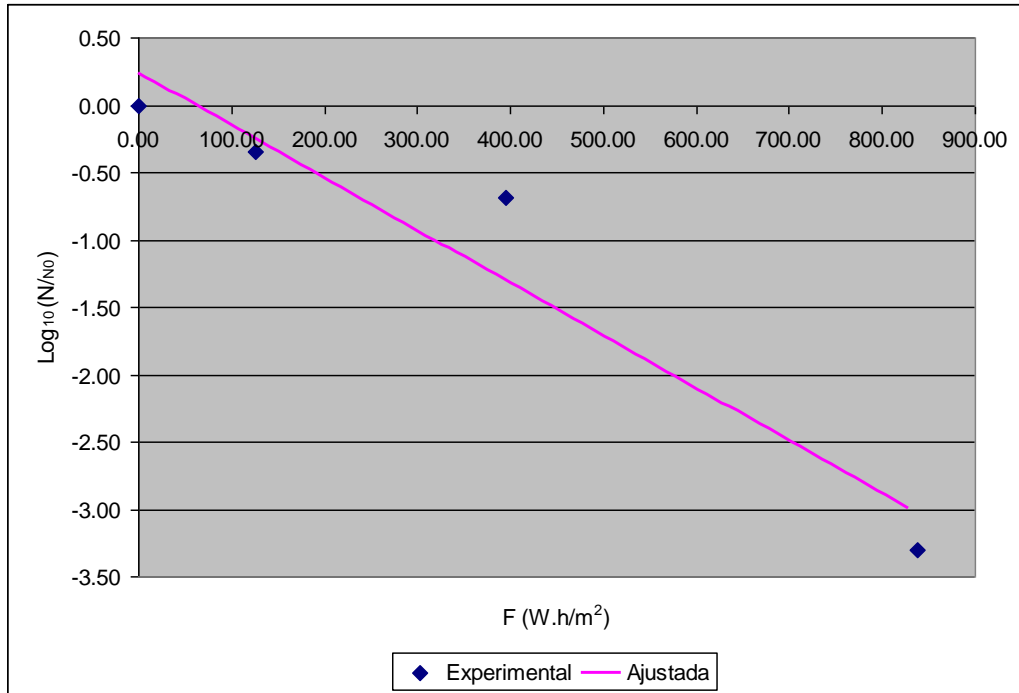


Figura 29. Cinética de inactivación para *Escherichia coli*, PET Transparente, T=52°C

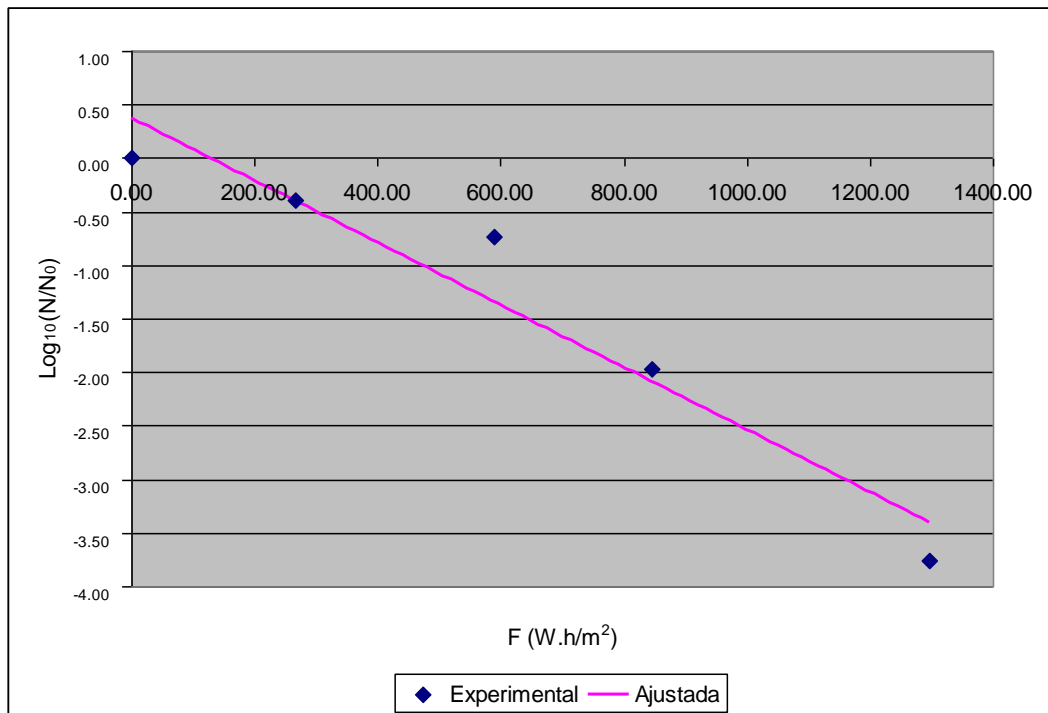


Figura 30. Cinética de inactivación para *Escherichia coli*, PET Transparente, T=38°C

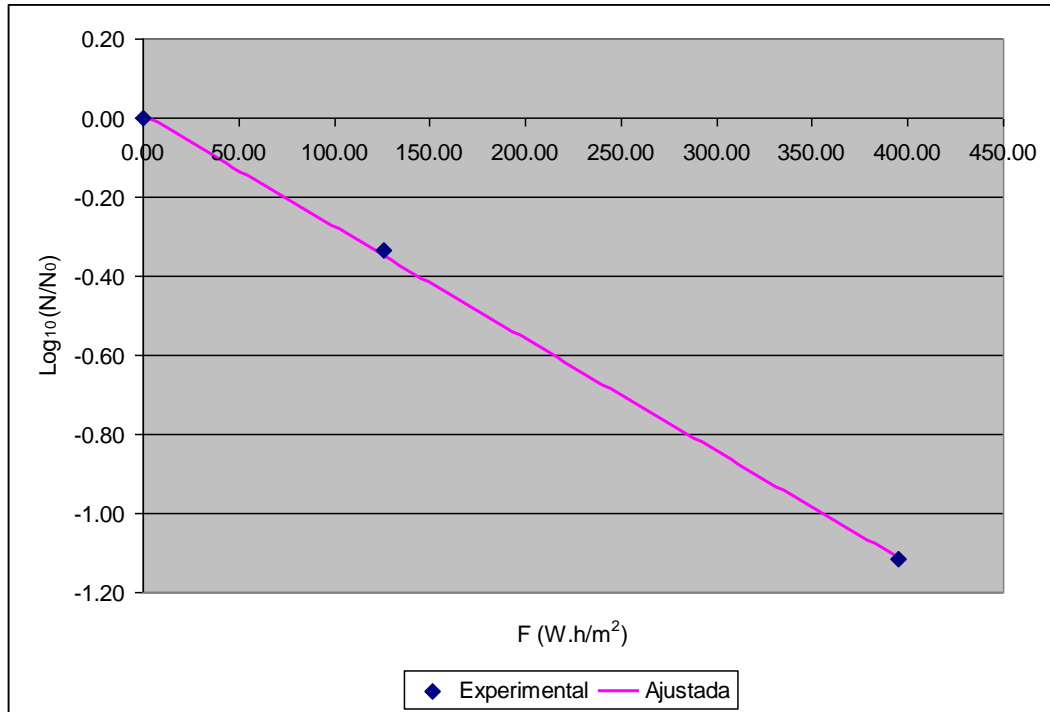


Figura 31. Cinética de inactivación para *Escherichia coli*, PET ½ negro, T=72°C

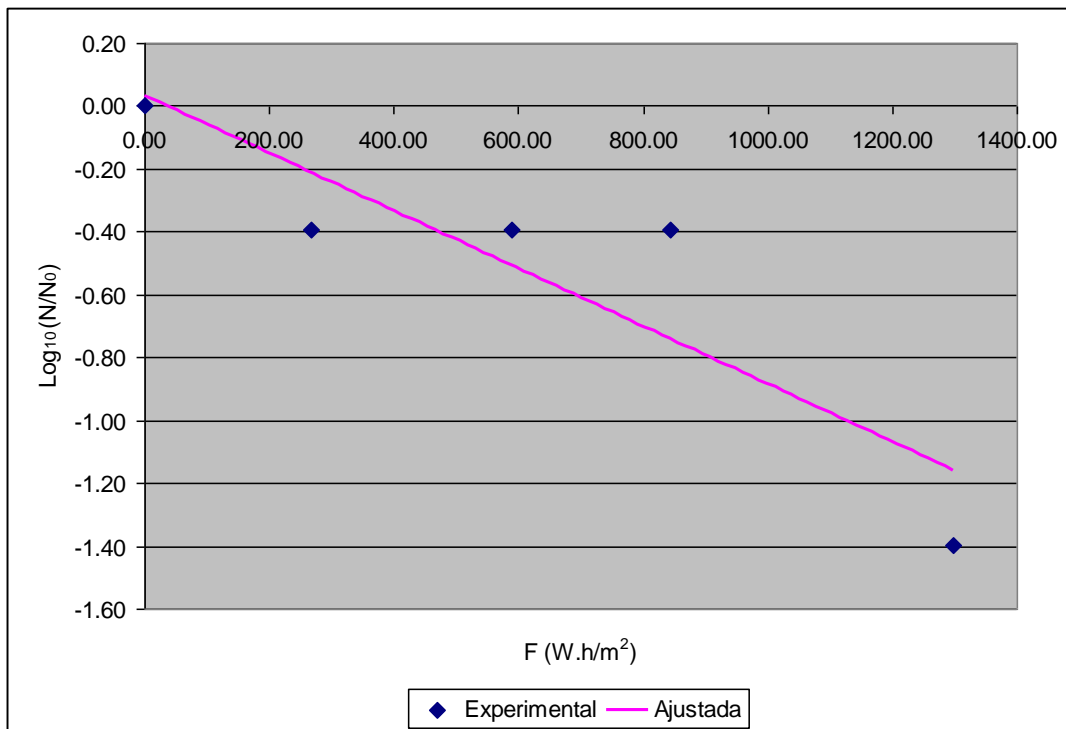


Figura 32. Cinética de inactivación para *Escherichia coli*, PET ½ negro, T=52°C

Tabla 18. Resultados de las cinéticas para *Escherichia coli*.

PET	k (m ² /W.h)	R	F _s (W.h/m ²)	F _{99.9%} (W.h/m ²)
Transparente				
T=52°C	0.009	0.961		768
T=38°C	0.007	0.964		987
½ Negro				
T=72°C	0.007	1		987
T=52°C	0.002	0.890		3454

k= velocidad de inactivación; R= Coeficiente de regresión; F_s= Dosis umbral (hombro); F_{99.9%}= Dosis para inactivar 3 log; F_{99.9%} + F_s = dosis total.

En la figura 33 se puede observar que la radiación tiene mayor efecto en *Escherichia coli*, al requerirse la menor dosis de radiación en el pet transparente aún con la temperatura baja. Aunque se observa que se disminuye la dosis requerida cuando aumenta la temperatura en el pet ½ negro, en ningún caso es menor que la obtenida con el pet transparente. Por el contrario, cuando la temperatura es baja, el valor de F_{99.9%} se incrementa de 987 a 3454 W.h/m² (3.5 veces).

Comparando la dosis de radiación requerida, F_{99.9%} con respecto a los coliformes totales, para *Escherichia coli* es inferior en el Pet transparente, hasta en 50%. Por lo tanto, la sensibilidad presentó el siguiente orden: coliformes totales < *Escherichia coli*.

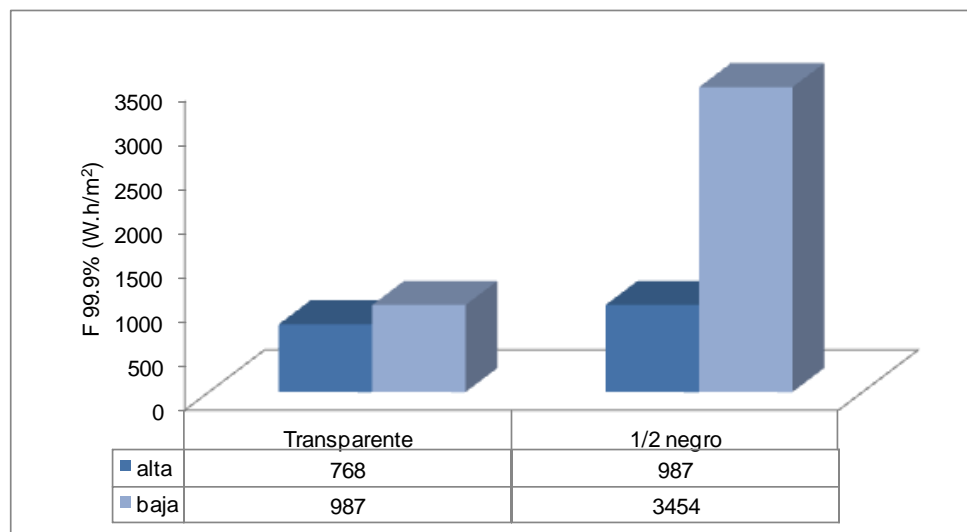


Figura 33. Dosis de radiación para inactivar al 99.9% de *Escherichia coli*.

Este resultado concuerda con estudios realizados para *Escherichia coli*, (Wegelin *et al.*, 1994) en los que la velocidad de inactivación no se ve afectada por temperaturas en el rango de 20 a 40°C, y en los que además se requiere una dosis umbral (hombro) para que inicie la inactivación como fue el caso para los coliformes totales. La velocidad de inactivación en este estudio, se incrementó sólo con temperaturas superiores a los 50°C.

En cuanto a la dosis requerida para lograr una reducción de 3-log de *Escherichia coli*, ésta sigue la misma tendencia que la reportada por otros autores (Acra, 1990; Wegelin *et al.*, 1994), en los que la radiación requerida disminuye cuando la temperatura es superior a 50°C. No es posible comparar los valores de k debido a

las variaciones en las condiciones experimentales y de medición de la radiación, al tipo y concentración inicial de las cepas.

En este estudio, *Escherichia coli* no presentó la mayor resistencia a la desinfección solar y coincide con otros estudios. Acra *et al.* (1990), obtuvieron la mayor resistencia con *Streptococcus faecalis* y lo proponen como indicador en lugar de *Escherichia coli*. Boyle (2008), comparó las cinéticas de inactivación de *Escherichia coli* contra *C. jejuni*, *S. epidermis*, *Y. enterocolítica*; en este caso tampoco requirió la mayor dosis ubicándola como tercera en sensibilidad. Dejung (2007), encontró que *P. aeruginosa* y *S. faecalis* son más resistentes.

Para el efecto de demora (hombro), que se presentó en la cinética de inactivación para coliformes totales, existen dos modelos que describen este comportamiento (Berney *et al.*, 2006; Wright, sin fecha; Wegelin *et al.*, 1994): el escenario de objetivos múltiples y el de múltiples ataques. El escenario de objetivos múltiples sugiere que un organismo contiene n sitios definidos, cada uno de los cuales debe recibir al menos un ataque antes de que la célula sea inactivada, mientras que el modelo multi-ataques, asume que un solo sitio objetivo debe ser atacado al menos n veces. En el caso de radiación solar por UV-A puede ser una combinación de ambos, ya que a diferencia de la radiación por UV-C en donde sólo existe un sitio objetivo que es el ADN, el espectro de UV-A puede dañar a las células en diferentes formas: daño a la membrana, daño al ADN, ó daño indirecto por especies de oxígeno reactivas.

Al igual que en otros estudios (Wegelin *et al.*, 1994; Berney *et al.*, 2006; Siriwong *et al.*, 2006; Meera *et al.*, 2008; Ubomba-Jaswa *et al.*, 2009), se observó el efecto de la temperatura en el incremento de la velocidad de inactivación con botellas parcialmente pintadas de negro, sólo cuando la intensidad de radiación fue alta y por las propiedades absortivas del pet pintado se incrementó la temperatura a más de 40°C, combinando el efecto del calor con la radiación. En cambio, cuando la insolación es baja, la dosis que reciben las botellas es todavía menor y la temperatura no se incrementa lo suficiente para inactivar a los microorganismos.

7.1.2 Cinética de inactivación para *Salmonella*

Las condiciones de radiación solar global para las pruebas con *Salmonella* se presentan en la Figura 34, donde se observa que la mayor radiación se tuvo para la prueba con *Salmonella arizonae*.

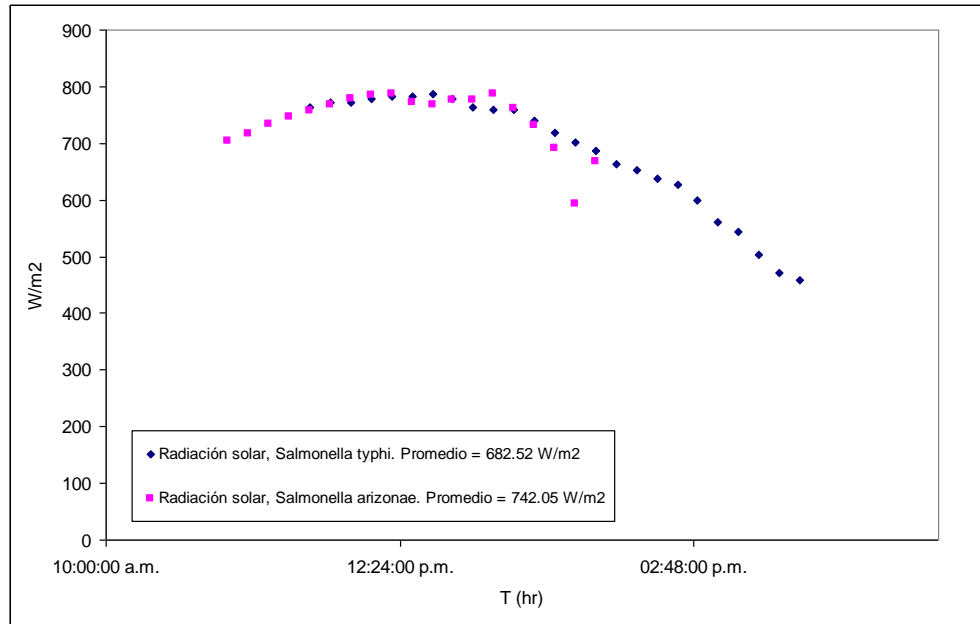


Figura 34. Radiación registrada para las pruebas con *Salmonella*.

En la prueba con *Salmonella arizonae* no se logró la inactivación total aún cuando la radiación promedio fue de 742 W/m² y 3 000 W.h/m² como radiación acumulada; tampoco influyó el incremento de la temperatura hasta 66°C en la botella ½ negra. Las cinéticas de inactivación para este microorganismo no siguen un comportamiento lineal como se observa en las figuras 35 y 36, por lo que los coeficientes de regresión son muy bajos (tabla 19).

Para *Salmonella typhi* se observa un comportamiento lineal para la combinación de radiación y temperatura (pet ½ negro) (Figs. 37 y 38); sin embargo, en el pet transparente se pierde la linealidad y se obtiene un coeficiente de regresión bajo (r=0.719). Los valores para las cinéticas indican que la velocidad de inactivación se incrementa con la temperatura (tabla 19).

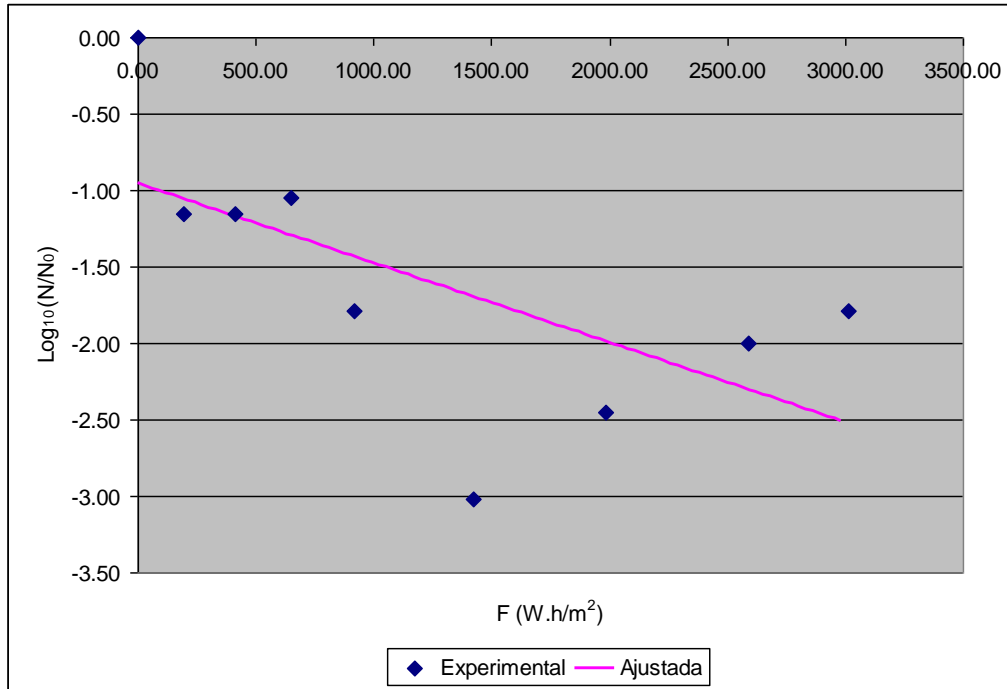


Figura 35. Cinética de inactivación para *S. arizonae*, PET transparente, 47°C.

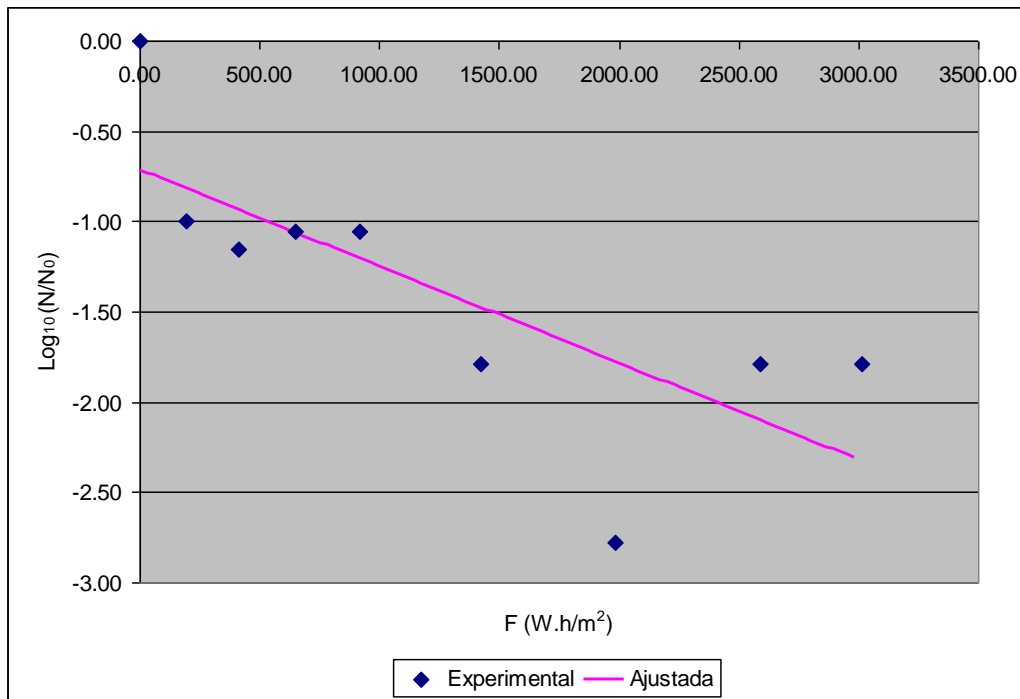


Figura 36. Cinética de inactivación para *S. arizonae*, PET 1/2 negro, 66°C.

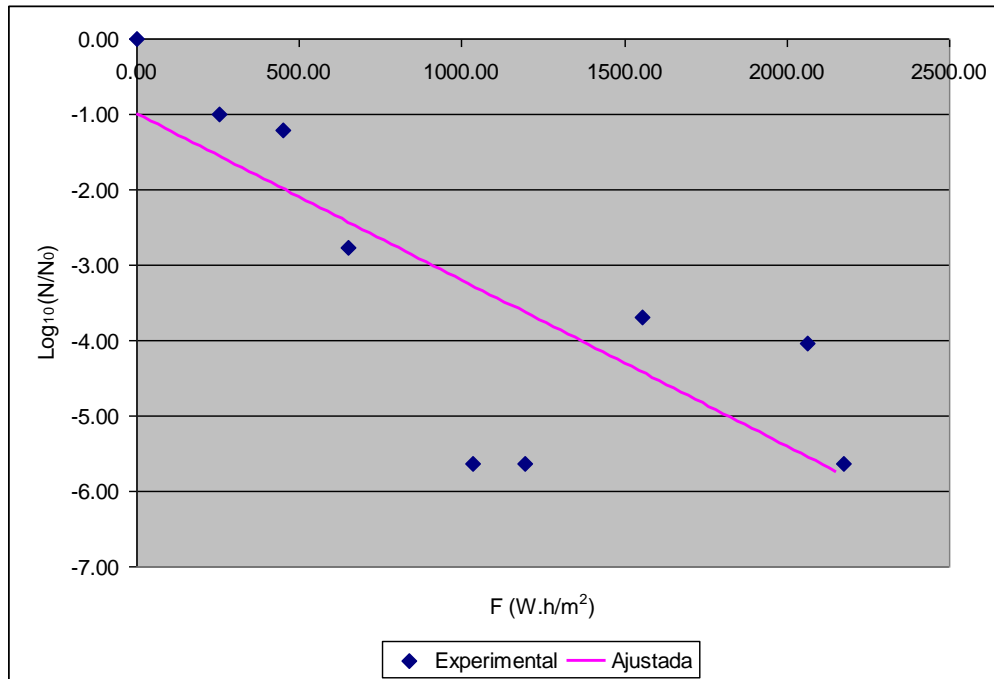


Figura 37. Cinética de inactivación para *S. typhi*, PET transparente, 40°C.

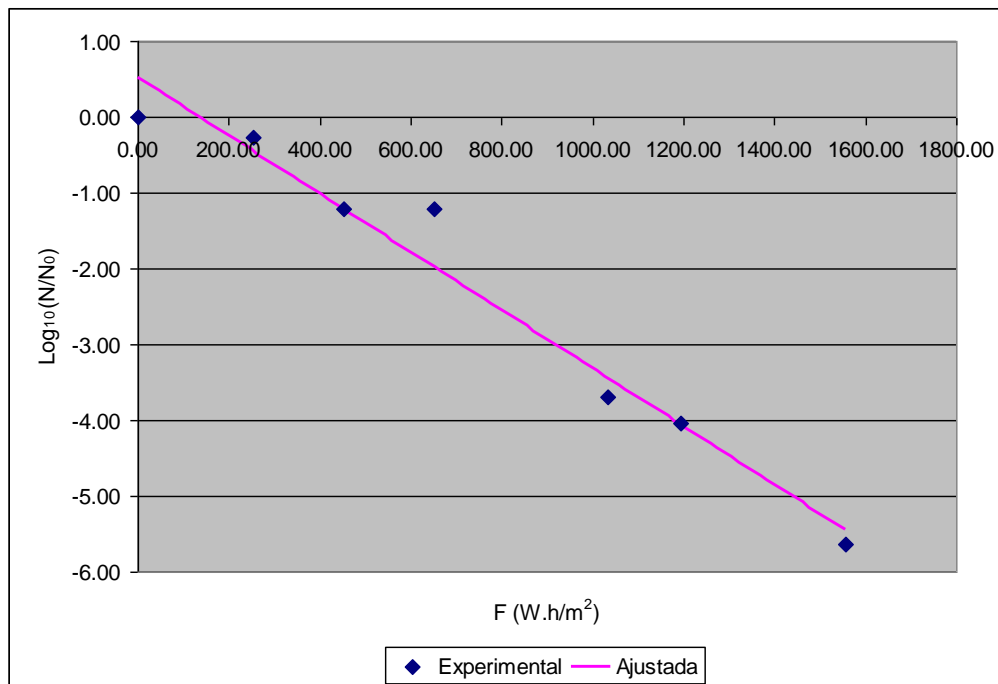


Figura 38. Cinética de inactivación para *S. typhi*, PET ½ negro, 51°C.

Tabla 19. Resultados de k y F_{99.9%} para *Salmonella typhi* y *Salmonella arizonae*.

Microorganismo	PET	k (m ² /W)	R	F _s (W.h/m ²)	F _{99.9%} (W.h/m ²)
<i>Salmonella arizonae</i>	Transparente T=47°C	0.0012	0.637		5756
	½ Negro T= 66°C	0.0012	0.748		5756
<i>Salmonella typhi</i>	Transparente T=40°C	0.0050	0.786		1382
	½ Negro T= 51°C	0.009	0.982		768

k= velocidad de inactivación; R= Coeficiente de regresión; F_s= Dosis umbral (hombro); F_{99.9%}= Dosis para inactivar 3 log; F_{99.9%} + F_s = dosis total.

En la Figura 39 se comparan las dosis requeridas para inactivar 3log de *Salmonella arizonae*, se observa que se requieren 5756 W.h/m² que equivalen a una insolación mínima de 800 W/m² durante siete horas, si la intensidad es menor, el tiempo de exposición se incrementa por lo que sería difícil cumplir estos parámetros en condiciones reales de operación.

Para *Salmonella typhi* se reduce la dosis de radiación con la combinación de radiación +temperatura en el PET ½ N con T=51°C. Lo anterior se corrobora al comparar los valores de F_{99.9%}, al requerirse el doble de dosis de radiación para el pet transparente.

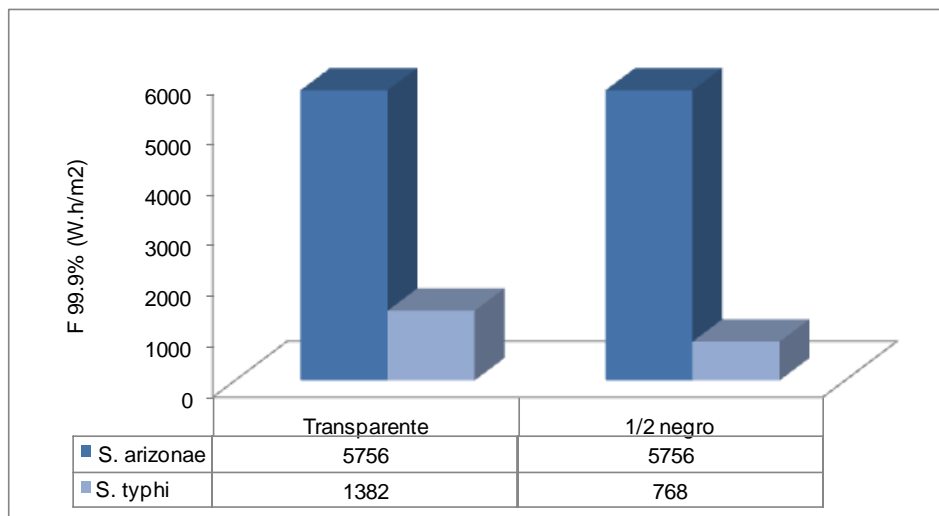


Figura 39. Dosis de radiación para inactivar al 99.9% de *S. arizonae* y *S. typhi*.

La variación en los resultados para *Salmonella* la pudo causar la resistencia que presenta este microorganismo a la desinfección solar (Acra, 1984; Smith, 2000); al compararla con *Escherichia coli*, *Streptococcus faecalis* y *Vibrio cholerae*, requirió de 7-8 h para su inactivación e incluso no recomiendan utilizar a los coliformes fecales como indicadores para monitorear la desinfección solar, sino a *Salmonella*.

Berney *et al.* (2006b) reportaron que *Salmonella typhimurium* requiere una fluencia mayor y por tanto es más resistente que *Escherichia coli* y *Vibrio cholerae* a la desinfección solar. Tampoco recomienda a *Escherichia coli* como indicador para medir la respuesta de bacterias entéricas a la desinfección solar.

Otra causa puede atribuirse al método de detección, que pudo inhibir el crecimiento de organismos débiles y dañados por el proceso de radiación solar para algunas muestras por lo que se obtiene una variación alta en los resultados. Dejung (2007), encontró que *Salmonella* spp fue más sensible que *Escherichia coli*, *S. faecalis* y *P. aeruginosa* a la desinfección solar. Esta conclusión la obtuvo a partir de los resultados de cuantificación utilizando sólo medio selectivos por lo que se pudo sobreestimar la eficiencia en la inactivación de este microorganismo.

Smith (2000), determinó en estudios con *Salmonella typhimurium*, que no siempre se puede detectar la sobrevivencia de este microorganismo mediante cultivo en medios enriquecidos ni selectivos después de aplicar radiación solar, ya que persiste como célula activa pero no cultivable (APNC) es decir, como “viable, pero no cultivable” aunque se reduce su virulencia con la exposición a la radiación solar (simulada, en este estudio) y el calor; además concluyen que si bien no siempre se puede inactivar totalmente a los microorganismo, éstos pierden su infectividad por el proceso de desinfección solar.

En este estudio, los resultados mostraron similitudes con los de Smith (2000), al presentar variaciones en la cuantificación y dificultad para cultivar *Salmonella* en medios selectivos, por lo que se tuvo que recuperar a las bacterias con un enriquecimiento previo al cultivo en medios selectivos.

Aunque los resultados de $F_{99.9}$ para *Salmonella typhi* son menores que para los coliformes totales no se recomienda utilizarlos como indicadores de inactivación por la variación de los resultados con *Salmonella arizonae*. Es necesario realizar pruebas con diferentes métodos de detección para evaluar de manera adecuada la respuesta de *Salmonella* al proceso de desinfección solar. Después de esta prueba la sensibilidad queda de la siguiente manera: *Escherichia coli*>coliformes totales>*Salmonella arizonae*.

7.1.3 Cinética de inactivación para *Enterococcus faecalis*

Esta prueba se realizó con día soleado y como se observa en la figura 40, la radiación solar fue alta, con un promedio de 880 W/m². Las cinéticas de inactivación presentaron un comportamiento de primer orden para ambos tipos de pet (Figs. 41 y 42). La velocidad de inactivación fue mayor para el pet transparente con 60°C, aunque la temperatura se incrementó hasta 76°C en el pet ½ negro (tabla 20); esto indica que el aumento de la temperatura en el pet pintado no tuvo un efecto significativo en la inactivación para *E. faecalis* y por lo tanto, no es necesario utilizar este tipo de pet.

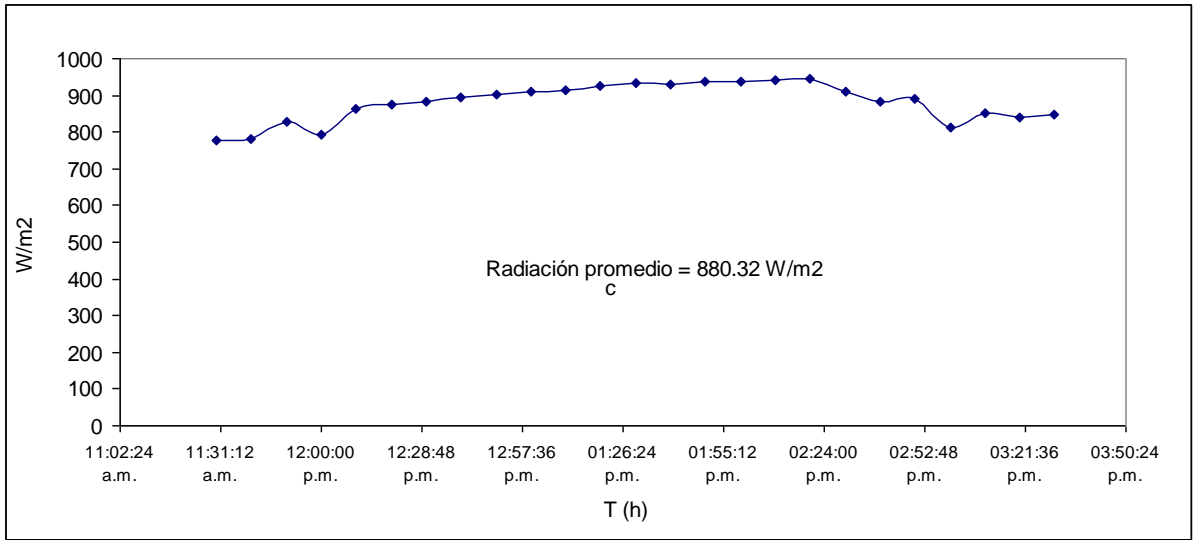


Figura 40. Radiación registrada para las pruebas con *Enterococcus faecalis*

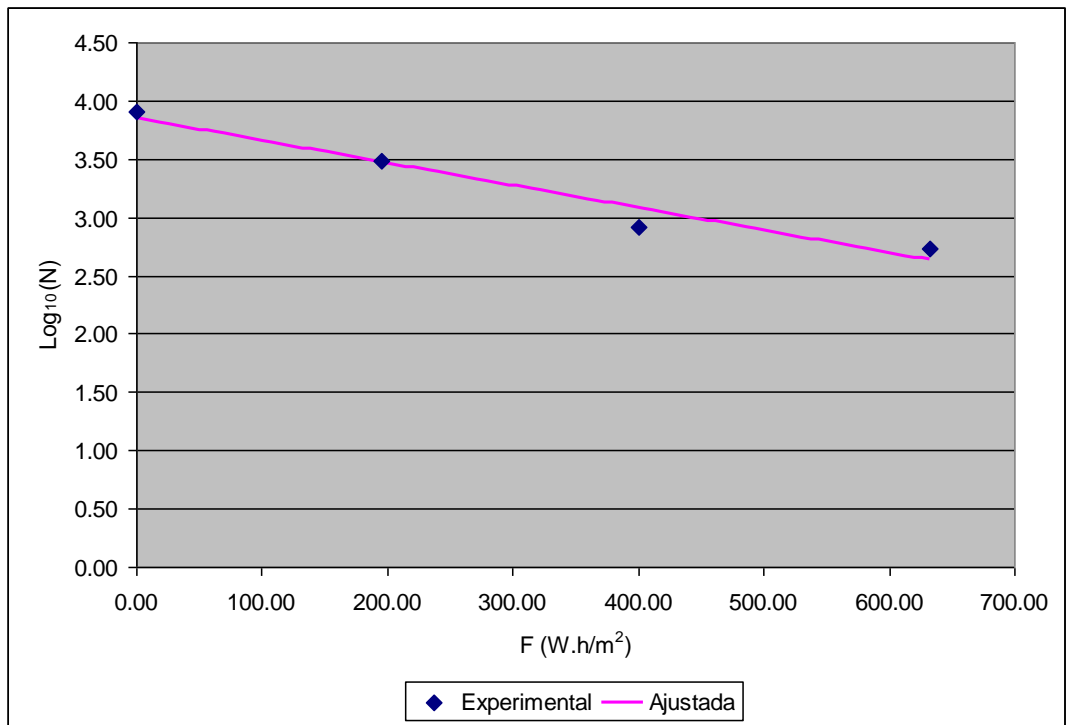


Figura 41. Cinética de inactivación para *E. faecalis*, PET transparente, T=60°C.

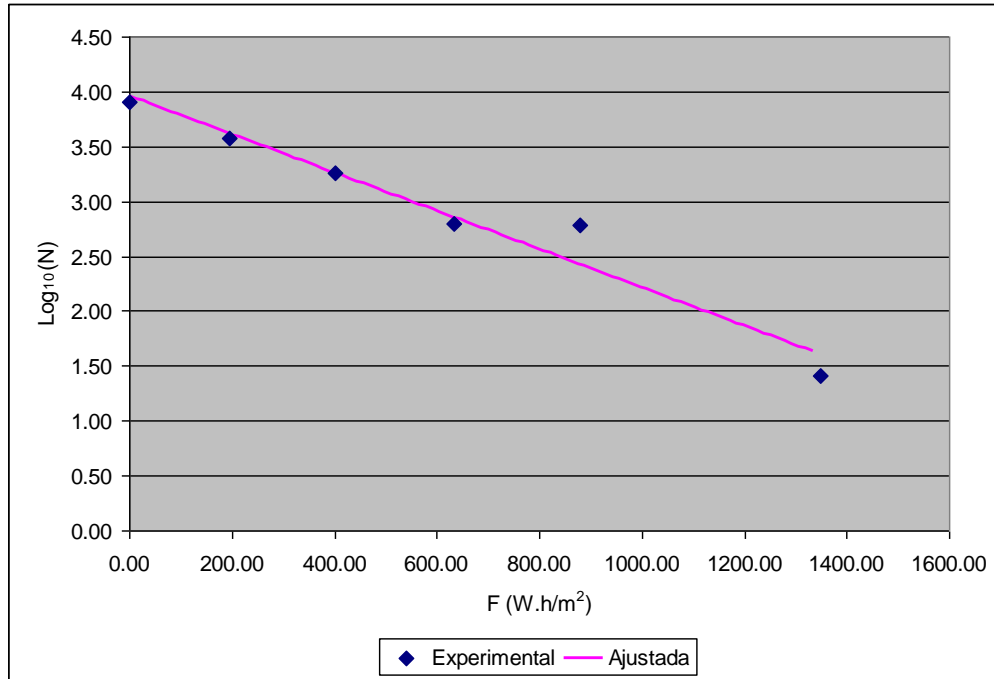


Figura 42. Cinética de inactivación para *E. faecalis*, PET ½ negro, T=76°C.

Tabla 20. Resultados de *k* y $F_{99.9\%}$ para *Enterococcus faecalis*.

PET	<i>k</i> (m ² /W)	R	F_s (W.h/m ²)	$F_{99.9\%}$ (W.h/m ²)
Transparente T=60°C	0.0044	0.976		1570
½ Negro T= 76°C	0.0040	0.978		1727

k= velocidad de inactivación; R= Coeficiente de regresión; F_s = Dosis umbral (hombro); $F_{99.9\%}$ = Dosis para inactivar 3 log; $F_{99.9\%} + F_s$ = dosis total.

Por lo tanto, la dosis mayor la requiere la botella ½ negra (Figura 43), con lo que se comprueba que el efecto principal corresponde a la radiación solar y que con la botella parcialmente pintada se interfiere con la transmisión de la radiación y aunque se incrementa la temperatura, no se mejora el proceso de inactivación. Este resultado es congruente con otros estudios (Wegelin *et al.*, 1994) en los que tampoco se observaron influencia de la temperatura en la dosis de radiación para este microorganismo.

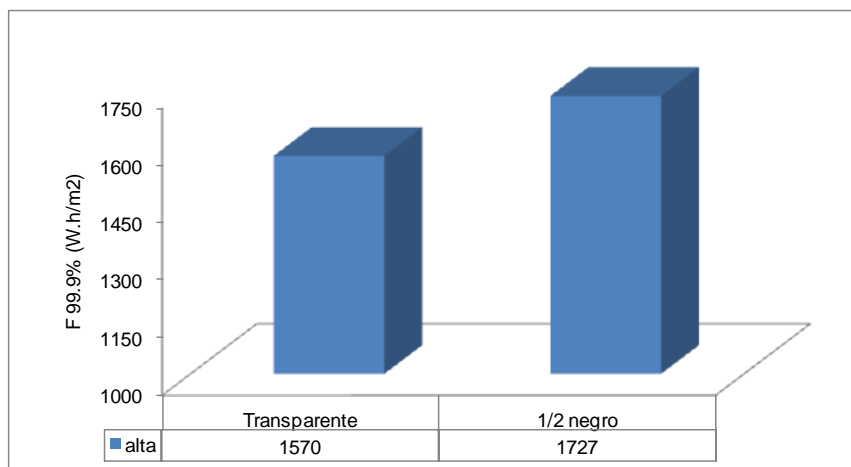


Figura 43. Dosis de radiación para inactivar al 99.9% de *Enterococcus faecalis*.

Tampoco se puede utilizar *Escherichia coli* para representar la inactivación de este microorganismo ya que *E. faecalis* requiere dosis de radiación mayores; en cambio, los coliformes totales requieren de dosis similares por lo que serían más adecuados como indicadores para este microorganismo.

7.1.4 Cinética de inactivación para *Vibrio cholerae* O1 Inaba

Las pruebas se realizaron en día soleado y nublado por lo que la intensidad de radiación fue diferente para cada experimento (fig.44).

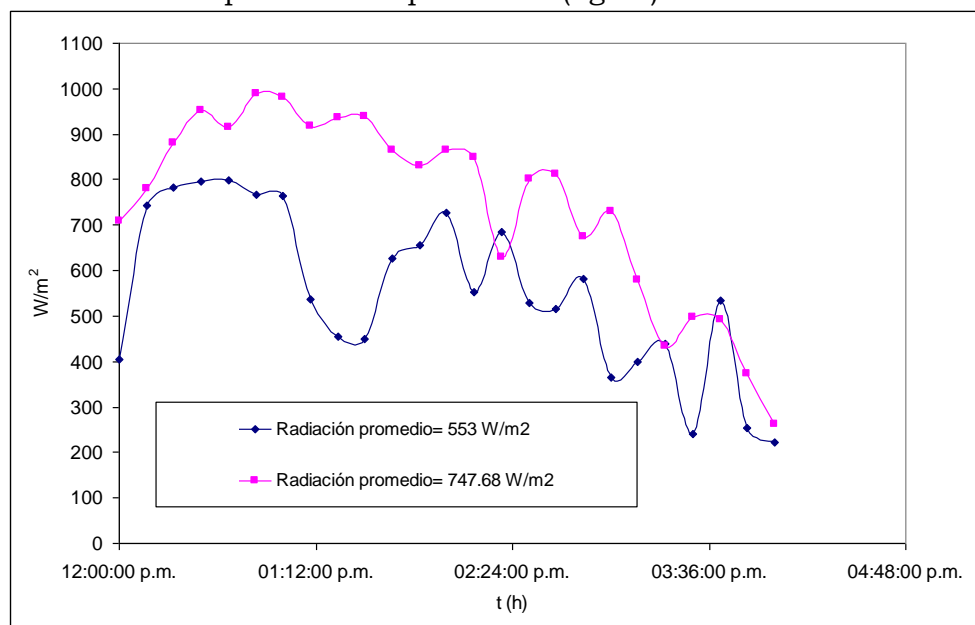


Figura 44. Radiación registrada para las pruebas con *Vibrio cholerae* O1 Inaba.

La cinética de inactivación presentó un comportamiento lineal en el pet transparente a 45°C (Figura 45); sin embargo, cuando la temperatura fue menor para este tipo de pet (30°C), se presentó el efecto de demora (hombro) antes de iniciar la inactivación primer orden (Figura 46). Para el pet 1/2 negro, tanto para la temperatura de 64°C como para 43°C, se presentó el efecto de demora, con el

efecto más marcado para la menor temperatura (Figs. 47 y 48). Esto indica que con el pet parcialmente pintado se disminuye la eficiencia del proceso y que son las radiaciones las que ejercen el mayor daño.

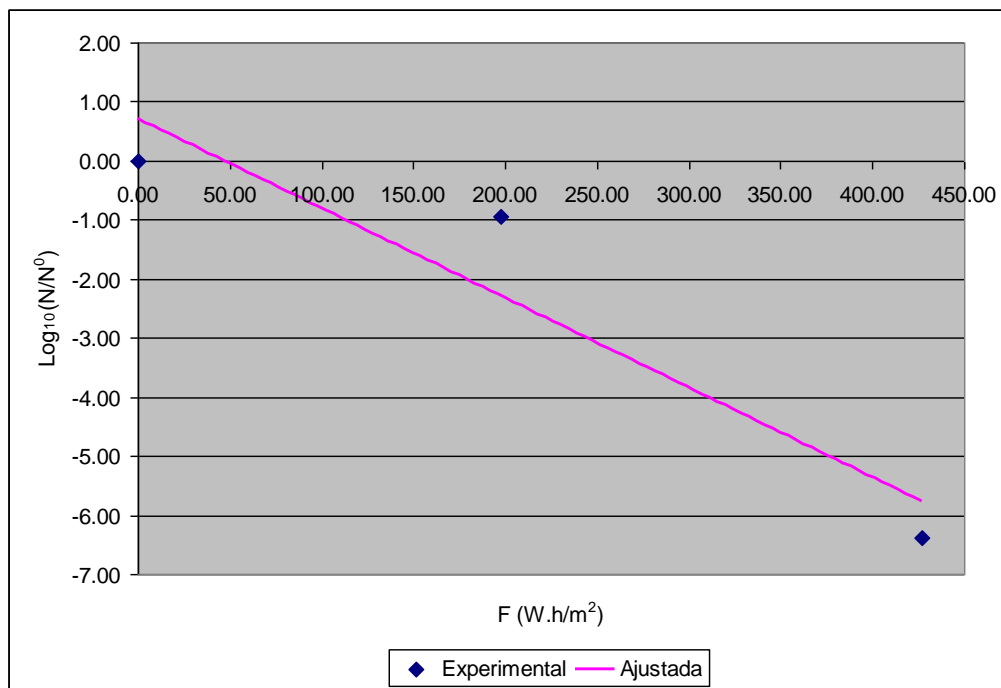


Figura 45. Cinética de inactivación para *V. cholerae* O1 Inaba. PET transparente, T=45°C.

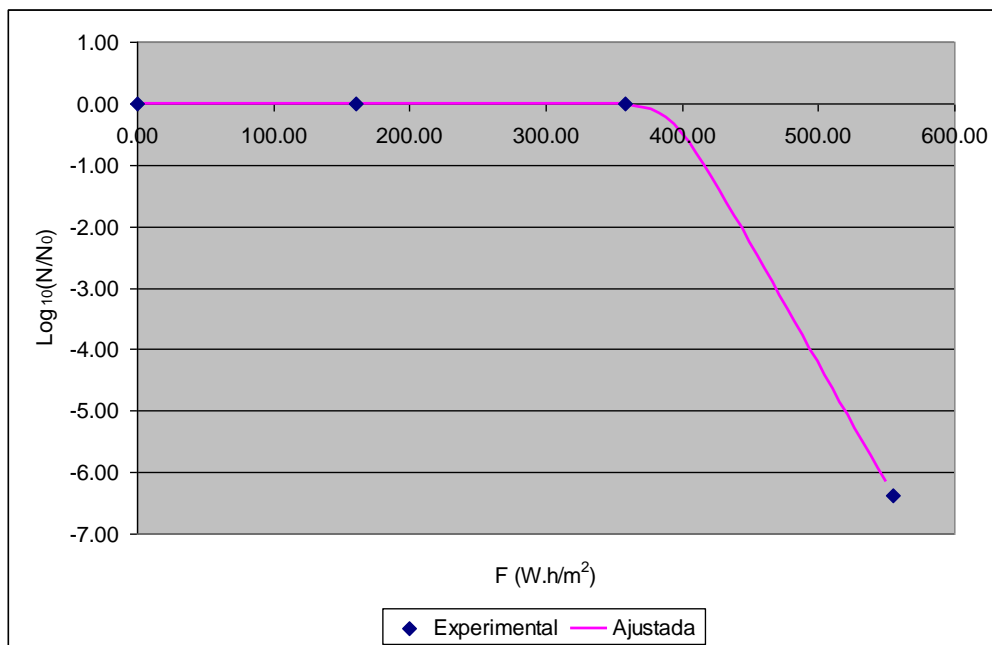


Figura 46. Cinética de inactivación para *V. cholerae* O1 Inaba. PET transparente, T=30°C.

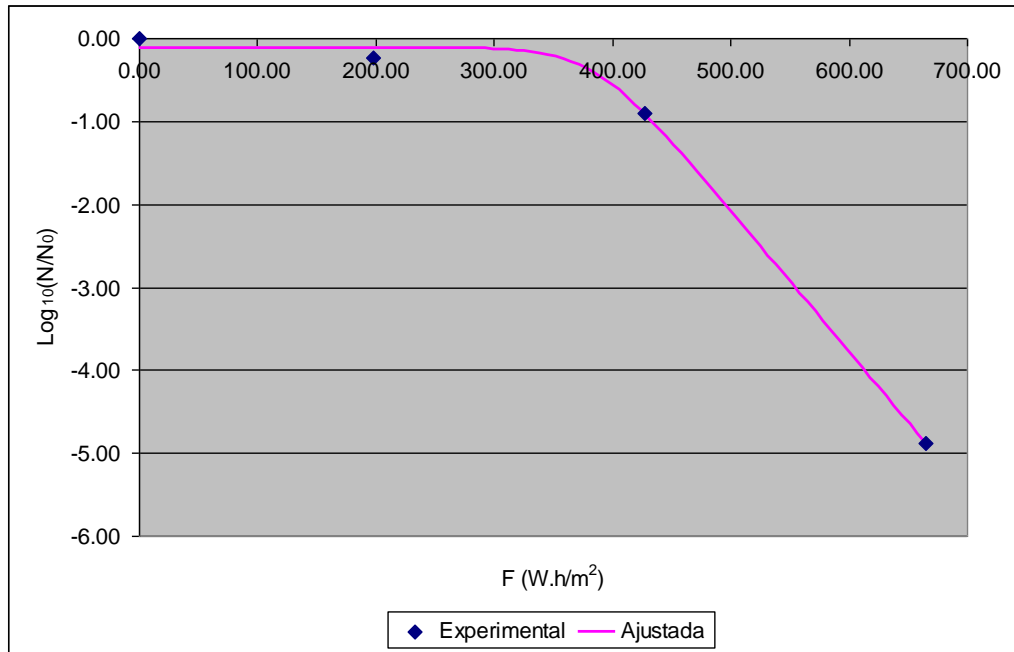


Figura 47. Cinética de inactivación para *V. cholerae* O1 Inaba. PET ½ negro, T=64°C.

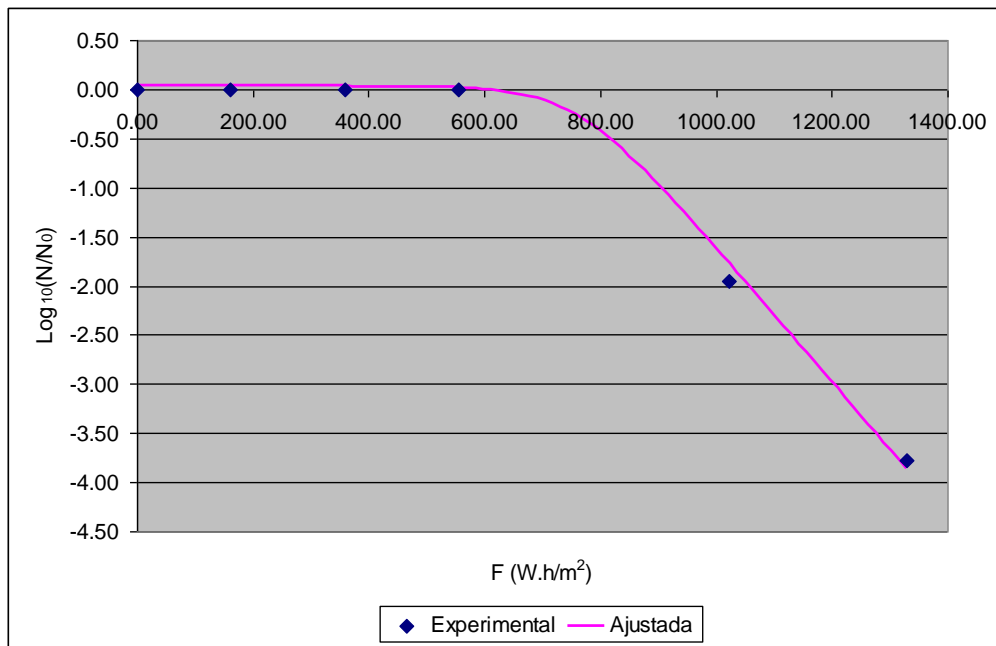


Figura 48. Cinética de inactivación para *V. cholerae* O1 Inaba. PET ½ negro, T=43°C.

Al comparar las velocidades de inactivación, en la tabla 21 se observa que la mas rápida se obtuvo en el pet transparente a 45°C y la más lenta fue para el pet ½ negro a 43°C.

Tabla 21. Resultados de k y $F_{99.9\%}$ para *Vibrio cholerae* O1 Inaba.

PET	k (m^2/W)	R	F_s ($W.h/m^2$)	$F_{99.9\%}$ ($W.h/m^2$)	$F_{99.9\%}+F_s$
Transparente					
T=45°C	0.035	0.942		197	
T=30°C	0.09	1.00	392	77	469
½ Negro					
T=64°C	0.039	0.999	385	177	562
T=43°C	0.016	0.997	761	432	1193

k = velocidad de inactivación; R= Coeficiente de regresión; F_s = Dosis umbral (hombro); $F_{99.9\%}$ = Dosis para inactivar 3 log; $F_{99.9\%} + F_s$ = dosis total.

En cuanto a las dosis de radiación, en la figura 49 se puede observar que la dosis de radiación requerida para el mismo tipo de pet disminuye con el incremento de temperatura; sin embargo, al comparar los resultados entre la radiación y la combinación de radiación+temperatura (pet transparente y ½ negro) a 45-43 °C, la dosis se incrementa seis veces (de 197 a 1193 $W.h/m^2$) para el pet pintado, por lo que al igual que con *Enterococcus faecalis* no es conveniente utilizar este tipo de pet.

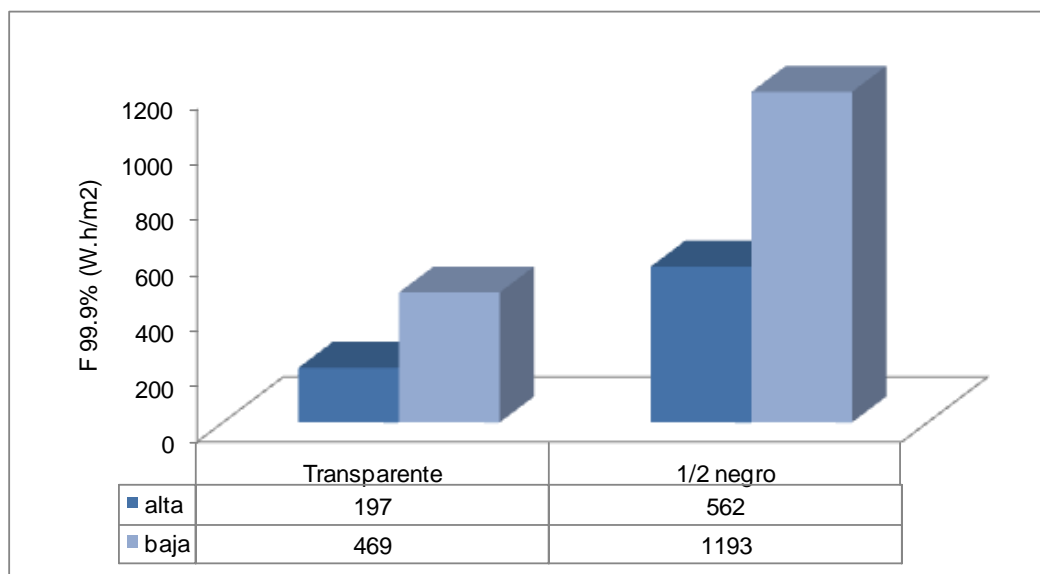


Figura 49. Dosis de radiación para inactivar al 99.9% de *Vibrio cholerae* O1 Inaba.

A diferencia de los coliformes, en donde el efecto de la temperatura en botellas transparentes es evidente arriba de 50°C , para *Vibrio cholerae* el efecto se obtiene desde 40°C y esto coincide con otros resultados (Berney *et al.*, 2006a y 2006b).

En general, *Vibrio cholerae* O1 Inaba requirió la menor dosis de radiación ya que se obtuvo la inactivación total con una dosis de 300 $W.h/m^2$, que corresponde a una radiación promedio de 747 W/m^2 durante 30 minutos. Este resultado sugiere que *Vibrio cholerae* puede representarse utilizando como indicadores a los coliformes fecales.

Comparando los resultados de inactivación para los microorganismos de prueba, la sensibilidad a la desinfección presentó el siguiente orden: *Vibrio cholerae* O1>*Salmonella typhi*>*Escherichia coli*>*Enterococcus faecalis* >coliformes totales> *Salmonella arizonae*.

De los organismos de prueba, *Vibrio cholerae*, como en otros estudios (Berney *et al.*, 2006a y 2006b), mostró la mayor velocidad de inactivación; aún en las condiciones más desfavorables se logra la inactivación con una dosis menor que para los demás microorganismos de prueba.

Aunque estos resultados parecen alentadores, surge la pregunta de hasta qué punto se sobreestima la eficiencia bactericida de la radiación solar, utilizando métodos convencionales para la detección y cuantificación de microorganismos. Reed (2005), resalta la importancia de subestimar la significancia de células que sólo reciben daño sub letal y que no pueden cuantificarse en condiciones de cultivo estándar bajo condiciones aeróbicas, las cuales aunque son efectivas para promover el crecimiento de bacterias sanas, no permiten el crecimiento de células fisiológicamente dañadas. Este mecanismo se origina por un proceso de autodestrucción inducido por la respiración bajo el cultivo en condiciones aeróbicas, en donde el metabolismo respiratorio produce radicales libres intracelulares que no permiten el crecimiento. Este comportamiento se observó en *Escherichia coli*, *S. flexneri* y *V. cholerae*.

Este mecanismo también puede explicar el estado “viable, pero no cultivable”, ya que las células dañadas no necesariamente entran aun estado fisiológico distinto, simplemente no tienen la capacidad de crecer bajo condiciones aerobias convencionales, como resultado de la autogeneración de especies de oxígeno reactivas (ROS, por sus siglas en inglés).

Para contrarrestar este efecto, sugieren considerar el cultivo bajo condiciones que eviten los efectos inhibitorios de autodestrucción que ocasionan las ROS, ya sea mediante el cultivo en condiciones completamente anaeróbicas para forzar a los microorganismos a utilizar trayectorias anaerobias para el metabolismo, (Khaengraeng, 2004; Reed, 2005) en un medio de crecimiento pre-reducido o por el uso de un contenedor anaeróbico con un medio suplementado con piruvato.

7.1.5 Efecto de la radiación y temperatura.

Se presentan las gráficas de inactivación para visualizar el efecto de la radiación y la temperatura con diferentes microorganismos. En los experimentos se corrió un testigo que consistió en almacenar agua a temperatura ambiente y en Pet negro, con el objeto de verificar la muerte natural de los microorganismos. En el testigo, se vio que los microorganismos se mantienen en concentraciones cercanas durante el tiempo de prueba, lo que significa que no existe en el agua materia o contaminantes que inhiban el crecimiento. Esto es, se atribuye la muerte microbiana a la radiación y la temperatura.

Los resultados de laboratorio mostraron que con una dosis acumulada de radiación de **3,241** W.h/m², correspondientes a una radiación promedio de 940 W/m² durante tres horas, en combinación con el incremento de temperatura, se logran

inactivar niveles de 10^5 coliformes totales/100 ml. Para analizar este efecto, se analizó la muerte natural de los microorganismos en el testigo de prueba y los sobrevivientes de cada tratamiento.

En la figura 50 se observa que, al separar los efectos, el de menor influencia es la temperatura con $1.67 \log_{10}$ de inactivación, le sigue la radiación con $2.02 \log_{10}$, ambos parámetros por separado no tienen efecto significativo. En cambio, la combinación de radiación+ temperatura presenta un efecto potenciado con $4.83 \log_{10}$ de inactivación, superior a la suma de los efectos ($3.69 \log_{10}$) por lo que el efecto es sinérgico y no aditivo.

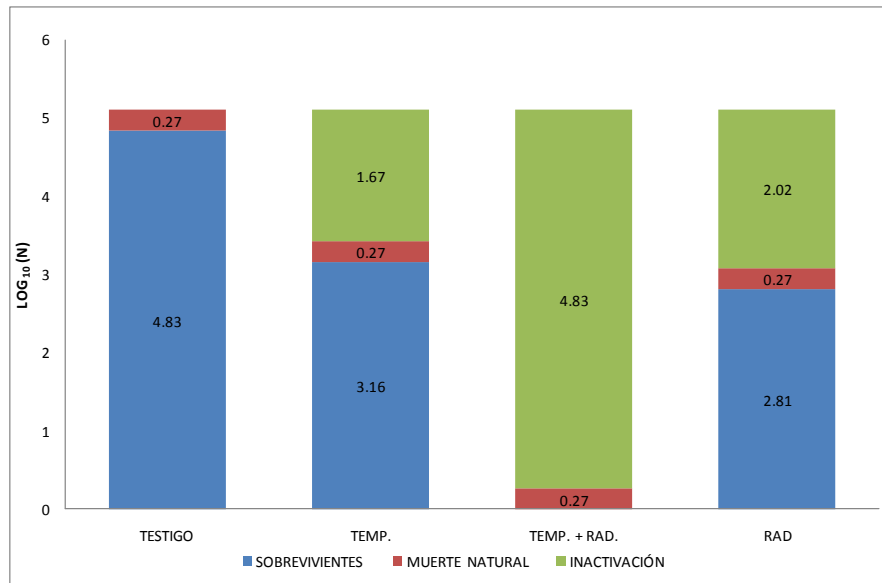


Figura 50. Efecto de la radiación, temperatura y radiación+temperatura para coliformes totales, radiación promedio 940 W/m^2 .

Para *Salmonella arizonae* (fig. 51), aún en el PET medio negro con temperaturas superiores a $50 \text{ }^\circ\text{C}$ la bacteria sobrevivió aunque en concentraciones menores. Además, el hecho de que en el testigo que se prueba a temperatura ambiente y en la obscuridad, esta especie se haya mantenido en concentraciones semejantes, prueba que también es capaz de soportar inanición. De esto se puede decir, que se requieren dosis de radiación superiores a 3000 W/m^2 para su eliminación.

Al separar los efectos no se obtienen resultados consistentes con los demás microorganismos al mostrar mayor sensibilidad a la temperatura ($2.41 \log_{10}$) que a la radiación y la combinación de rad+Temp. ($1.54 \log_{10}$).

No ocurre así con otras bacterias como *Yersinia* spp., *Erwinella americana* y *Pasteurella* spp., que con una dosis menor (392 W/m^2) desaparecieron en los Pets sujetos a radiación y con la combinación de temperatura +radiación (Fig. 52). Para estos microorganismos el efecto de la temperatura es menor ($1 \log_{10}$) que para la radiación ($3.6 \log_{10}$) y la combinación resulta en una inactivación mayor que para cada efecto ($4.4 \log_{10}$), es decir, también se obtiene un efecto sinérgico.

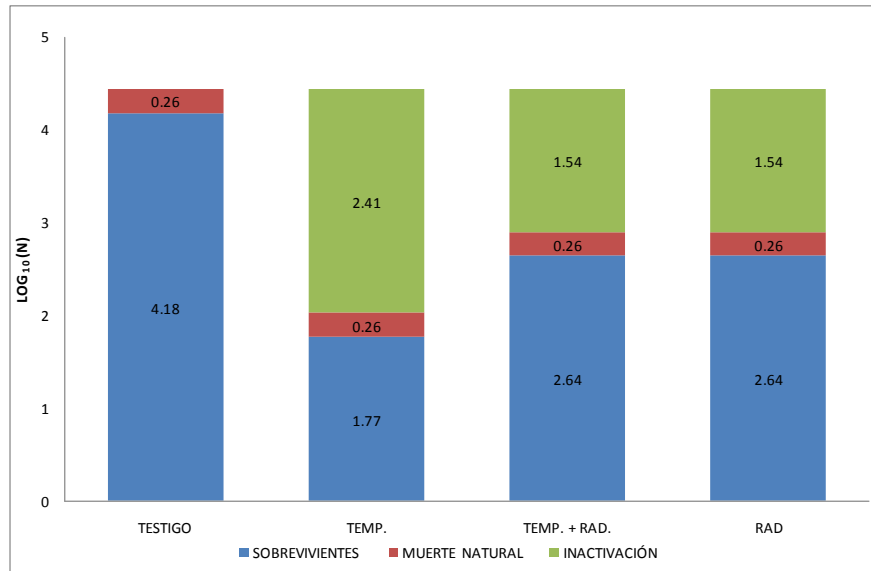


Figura 51. Efecto de la radiación, temperatura y radiación+temperatura para *Salmonella arizonae*, radiación promedio 936 W/m².

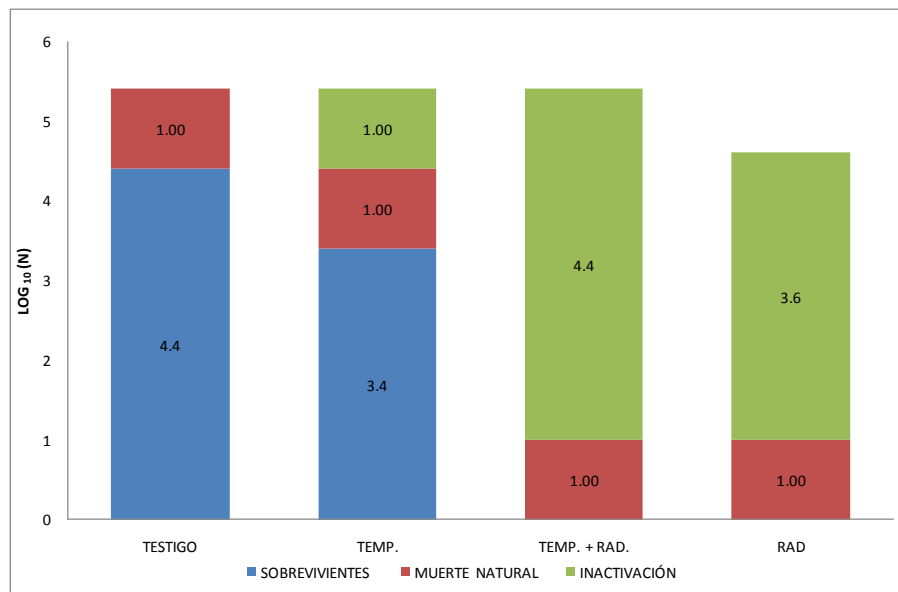


Figura 52. Efecto de la radiación, temperatura y radiación+temperatura para *Yersinia spp*, *Erwinella americana* y *Pasteurella spp*.

Estos resultados muestran la contribución de la radiación y cómo el efecto combinado con la temperatura puede tener un efecto sinérgico en la inactivación de los microorganismos (a excepción de *Salmonella arizonae*).

Es importante señalar que aunque se observa la inactivación ya sea por radiación o por la combinación de radiación más temperatura, ninguno de los métodos asegura que los microorganismos pierdan totalmente la capacidad de recuperarse y recrecer después de un periodo de tiempo. Por esto, se consideró importante evaluar el efecto de la temperatura y la radiación en la recuperación de los microorganismos durante el almacenamiento y así poder determinar cuál es el mecanismo principal para

lograr la inactivación que permita almacenar de manera segura el agua desinfectada.

7.2 Recrecimiento de bacterias heterótrofas, coliformes totales, *Escherichia coli*, enterobacterias, *Salmonella arizonae* y *Vibrio cholerae* O1 Inaba

Como en las pruebas de inactivación, se trabajó con el efluente de la planta de tratamiento de aguas residuales del IMTA y muestras reconstituidas con concentraciones conocidas de *Vibrio cholerae* O1 Inaba y *Salmonella aizonae* la cual presentó mayor resistencia a la desinfección solar. La radiación promedio durante la desinfección fue de 723 W/m² (fig. 53).

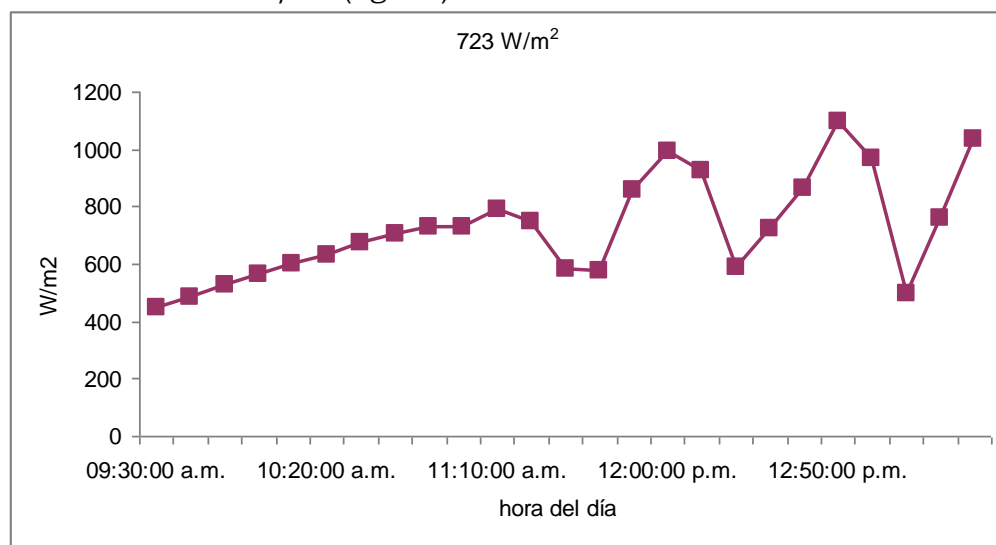


Figura 53. Radiación solar durante la prueba de recrecimiento.

En términos de inactivación de coliformes totales y *Escherichia coli*, con cuatro horas de exposición y una dosis acumulada de 2939 W.h/m², los resultados son consistentes con lo que se obtuvo en las pruebas para determinar las cinéticas al dar seguimiento al agua tratada en condiciones poco favorables. El punto importante en esta prueba, es que a partir de las 24 horas de almacenamiento, hubo una mayor recuperación de las bacterias en la botella parcialmente pintada de negro (Figs. 54 y 55). Lo que confirma que aunque la temperatura aumenta la velocidad de desinfección para algunos microorganismos, las radiaciones son las que ejercen mayor efecto letal.

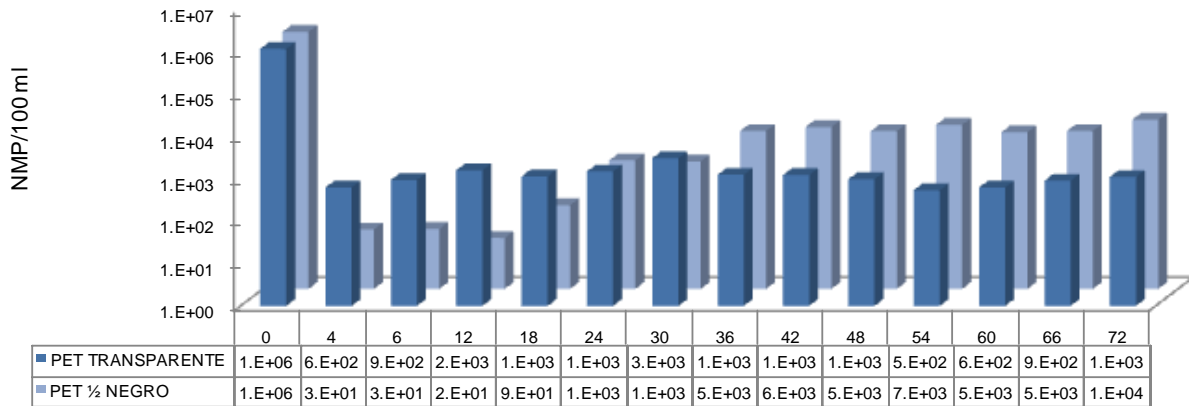


Figura 54. Recrecimiento de coliformes totales (2939 W.h/m²).

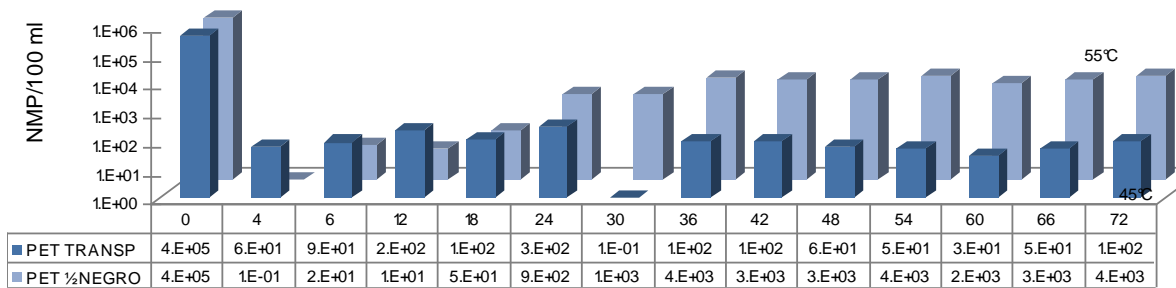


Figura 55. Recrecimiento de *Escherichia coli* (2939 W.h/m²).

En la cuenta estándar no se observó un decaimiento importante después del período de exposición a la luz solar y en este caso no se observó tendencia (Fig. 56).

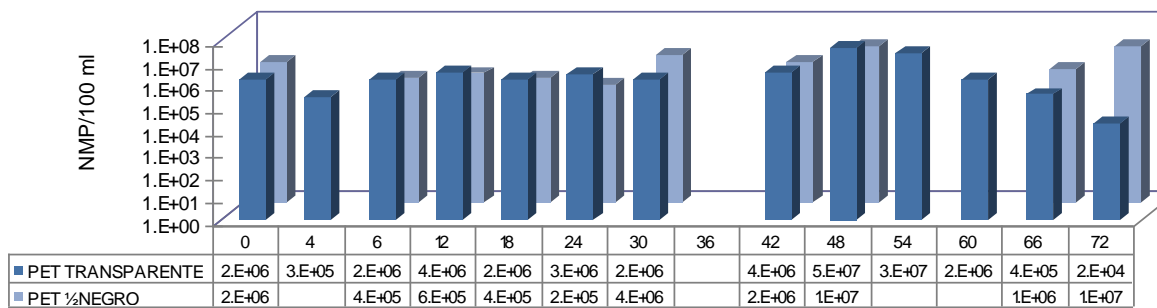


Figura 56. Recrecimiento de bacterias mesofilicas aerobias (2939 W.h/m²)

Vibrio cholerae y *Salmonella arizonae*, fueron totalmente inactivados después de cuatro horas de exposición y dosis de 2939 W.h/m², condiciones que se consideran poco favorables para una desinfección efectiva para *Salmonella*, como puede observarse en las Figs.57 a la 59. También en este caso el recrecimiento es en general mayor en las botellas parcialmente pintadas de negro, que en las transparentes.

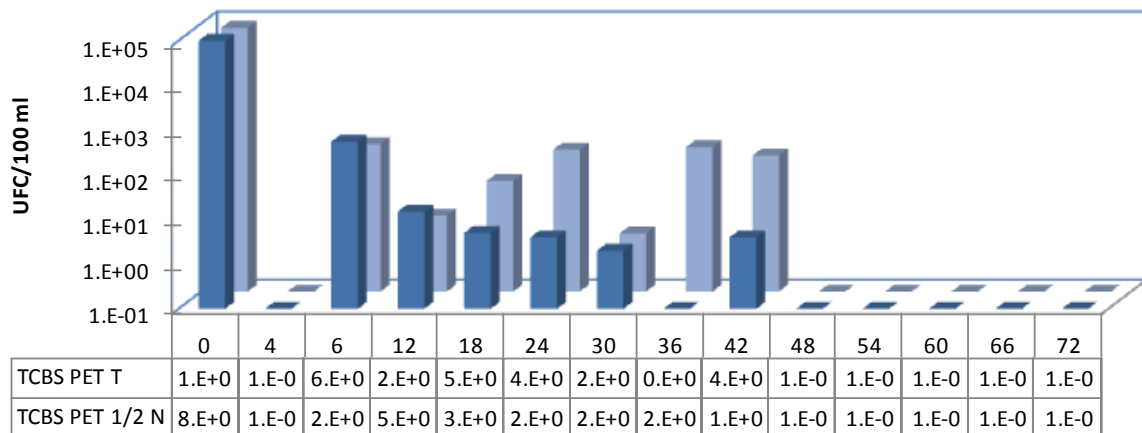


Figura 57. Recrecimiento de *Vibrio cholerae* O1 Inaba en agar TCBS (2939 W.h/m²)

Estos resultados indican que es necesario realizar más pruebas, y mediante la combinación del uso de medios de cultivo estándar y alternativos asegurar que estos patógenos sean efectivamente inactivados.

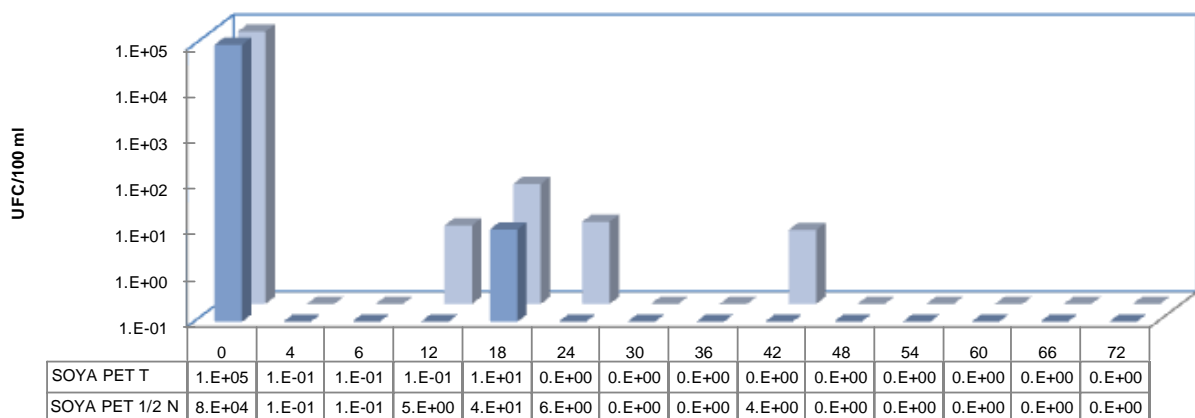


Figura 58. Recrecimiento de *Vibrio cholerae* O1 Inaba en agar soya tripticaseína (2939 W.h/m²)

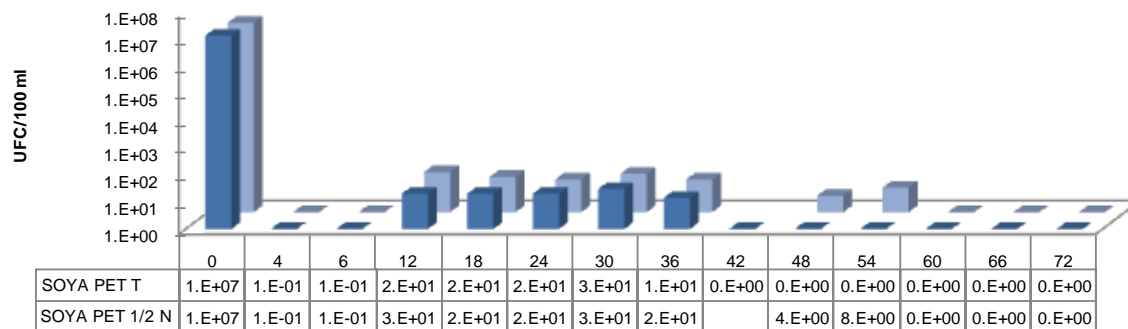


Figura 59. Recrecimiento de *Salmonella arizonae* en agar soya tripticaseína (2939 W.h/m²)

Todos los resultados muestran que la muerte de los microorganismos durante la exposición a la luz solar por tiempo suficientemente prolongado, se debe en gran medida a que las radiaciones UV-A, producen reacciones de foto oxidación (Khaengraeng *et al.*, 2005).

Los mecanismos de inactivación que sugiere la literatura en la aplicación de la radiación solar en el rango de 320 a 400nm que es la porción del espectro UV-A que atraviesa la atmósfera y que también puede pasar a través del pet (Wegelin *et al.*, 2001) se deben a componentes de las células que absorben la luz: los cromóforos ó sus grupos prostéticos (por ejemplo Dinucleótidos de Flavín Adenina, DFA; NAD, heme, quinonas, porfirinas, núcleos de S-Fe); los llamados fotosensibilizadores endógenos (Dejung *et al.*, 2007). La adsorción cambia a los cromóforos a un estado excitado y ocurre la transmisión de energía. Si el aceptor de energía se pierde, los fotones energéticos realizan cambios en la conformación de los cromóforos y como consecuencia se pierde la actividad biológica, culminando en la inactivación de la célula.

Además, los cromóforos excitados pueden transmitir la energía absorbida a moléculas de oxígeno generando radicales, conocidos como ROS. La producción de formas reactivas de oxígeno dependientes de la luz, incluye radicales libres de oxígeno tales como superóxido y radicales hidroxilo, junto con derivados tóxicos como el peróxido de hidrógeno. Las ROS reaccionan de manera no-selectiva con los componentes de la célula dañando las membranas y el ADN por rompimiento de las hélices y cambios en las bases.

Reed *et al.* (2001), encontraron que la inactivación de bacterias es más rápida en agua oxigenada mediante el mecanismo de foto-oxidación. En este mecanismo, las ROS se generan principalmente como resultado de la absorción de luz por fotosensibilizadores endógenos, como las porfirinas y flavinas intracelulares.

En cuanto a la inactivación térmica de microorganismos, se han identificado varios sitios en las células (Berney *et al.*, 2006) tales como las membrana, ácidos nucleicos

y ciertas enzimas. También hacen referencia a que la inactivación por calor se debe al desdoblamiento de ribosomas.

Sin embargo, cuando la exposición no es suficiente y la cantidad de microorganismos es muy alta, no se logra que el proceso de inactivación sea 100% efectivo.

También, se observa que tanto en la naturaleza como en ambientes controlados, la reparación de los daños que sufren los microorganismos como consecuencia de la exposición a factores ambientales que les resultan adversos, son importantes para su sobrevivencia y el mantenimiento de las especies, y para esto, cuentan con mecanismos moleculares y diversas estrategias adaptativas:

- Un sistema especial de reparación de ADN, la respuesta SOS, funciona en las células en las cuales esta molécula ha sido dañada (Brooks *et al.*, 1996).
- Rutas metabólicas alternas
- Cambios bioquímicos y fisiológicos en la célula (formas viables no cultivables). Como resultado del estrés ambiental, ocurren cambios en las características bioquímicas y fisiológicas de las bacterias que resultan en la falta de capacidad para crecer en los medios de cultivo estándar.
- Latencia. Los microorganismos se mantienen en estado de reposo, con una tasa metabólica basal.
- Moléculas que protegen de daño a otras moléculas importantes como el ADN. Algunos microorganismos poseen sustancias protectoras especiales que evitan el ataque de oxígeno singlete, las sustancias más importantes son los carotenoides, pues aunque reaccionan con esta forma de oxígeno, regresan a su estado base de manera espontánea (Brock *et al.*, 1987).
- Enzimas específicas que permiten la reparación de los daños que sufre el material genético de las células. La escisión de nucleótidos, ocupa un lugar importante en las defensas de la célula, debido a que actúa sobre un amplio rango de sustratos y por ende, tiene la capacidad para remover lesiones en prácticamente todos los pares de bases; este complejo sistema enzimático se encuentra tanto en procariotes, reino en el que se incluye a las bacterias, como en eucariotes, que incluye a los protozoarios (Örgnüc *et al.*, 1998).

La Fig. 60 ilustra de manera sencilla el mecanismo de reparación de material genético mediante enzimas y fotoactivación.

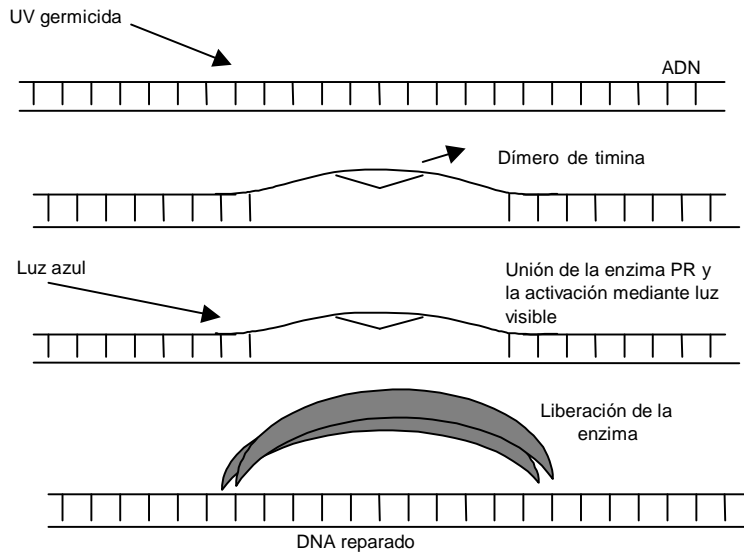


Figura 60. Reparación de ADN mediante fotoactivación y procesos enzimáticos.

De lo anterior, se asume que después de la exposición del agua a la radiación solar, el recrecimiento de las bacterias de origen fecal ya sea indicador o patógeno, puede deberse a que en las células existen mecanismos complementarios de reparación de daño.

7.3 RESULTADOS DE LA DESINFECCIÓN EN “LOS DORMIDOS”

7.3.1 Calidad bacteriológica del agua en la fuente de abastecimiento

En el hisopo que se sembró en la fuente de abastecimiento de la comunidad, no se detectaron patógenos estrictos, las especies detectadas en la fuente, son patógenos oportunistas (ver Tabla 22), que llegan a través de las excretas de humanos y de animales de sangre caliente, y se listan a continuación:

Tabla 22. Especies detectadas en la fuente de abastecimiento de la comunidad.

<i>Aeromonas hydrofila gr</i>	<i>Enterobacter sakazakii</i>
<i>Klebsiella oxytoca</i>	<i>Enterobacter cloacae</i>
<i>Klebsiella ornithinolytica</i>	<i>Chryseomonas luteola</i>
<i>Escherichia coli</i>	<i>Pseudomonas fluo./pútida</i>
<i>Klebsiella terrigena</i>	<i>Salmonella spp</i>
	<i>Pseudomonas aeruginosa</i>

Los géneros *Enterobacter*, *Klebsiella* y *Escherichia*, se encuentran dentro del grupo de los coliformes, de tal manera que no es raro que se hayan aislado. Se realizaron análisis de parámetros fisicoquímicos del agua, y no se detectaron problemas, motivo por el cual se decidió que la aplicación de esta metodología de desinfección es técnicamente factible.

7.3.2 Cinéticas de inactivación y evaluación del recrecimiento en la comunidad

Como indicadores de contaminación fecal se midieron los coliformes totales y *Escherichia coli*, la concentración de microorganismos fue menor que la utilizada en condiciones de laboratorio, con una concentración de 2.99×10^3 para la fuente local y del orden de $10^5 - 10^6$ en laboratorio.

La radiación solar fue en promedio alta con 722 W/m^2 (figura 61); sin embargo, se observa que presentó variaciones, es decir, se nubló en diferentes momentos del periodo de prueba.

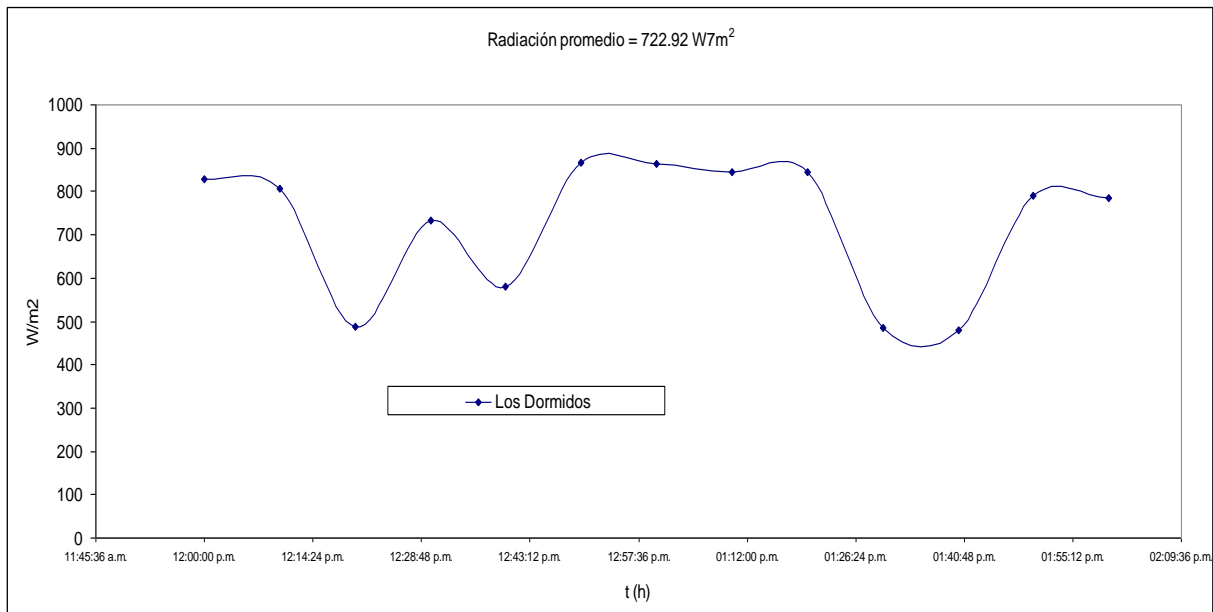


Figura 61. Radiación registrada para las pruebas en los Dormidos.

Al igual que las pruebas en laboratorio, tanto para coliformes totales como para *Escherichia coli* se observó un comportamiento de primer orden para la cinética de inactivación (Figs. 62 a 65), con incremento en la velocidad por efecto de la temperatura. Otro aspecto importante fue que las curvas de inactivación, a excepción de *Escherichia coli* en botella transparente, presentaron “hombros”, es decir, requirieron una dosis de radiación umbral antes para iniciar el proceso de inactivación que pudo causar la disminución y la variación de la radiación al inicio de la prueba.

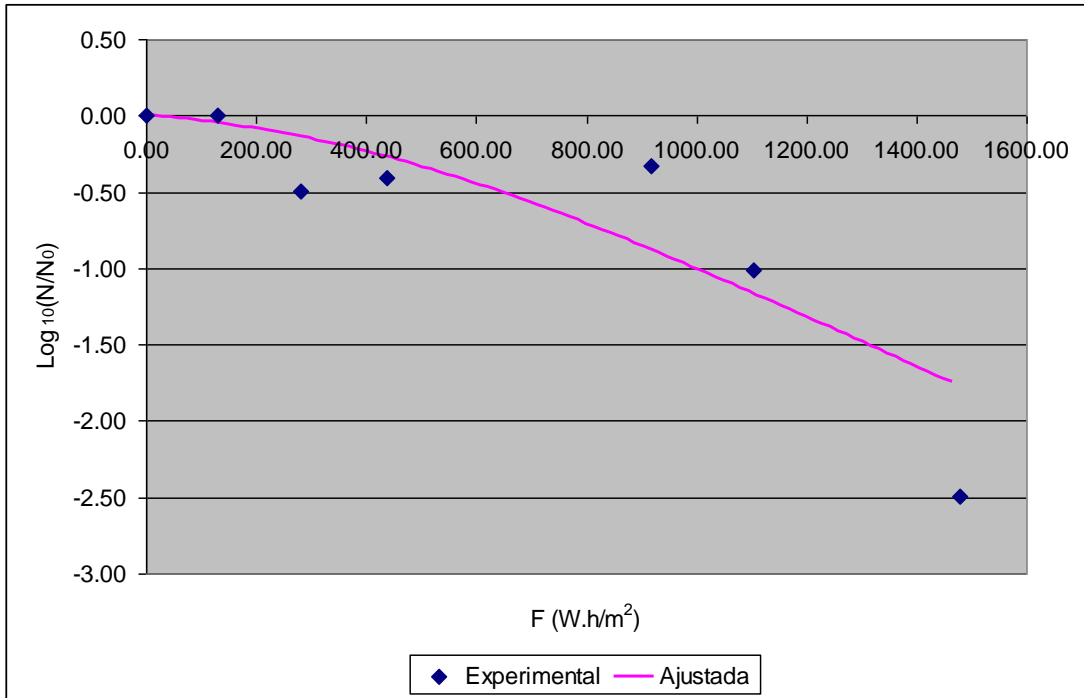


Figura 62. Cinética de inactivación, Los Dormidos, coliformes totales, PET transparente, 44°C.

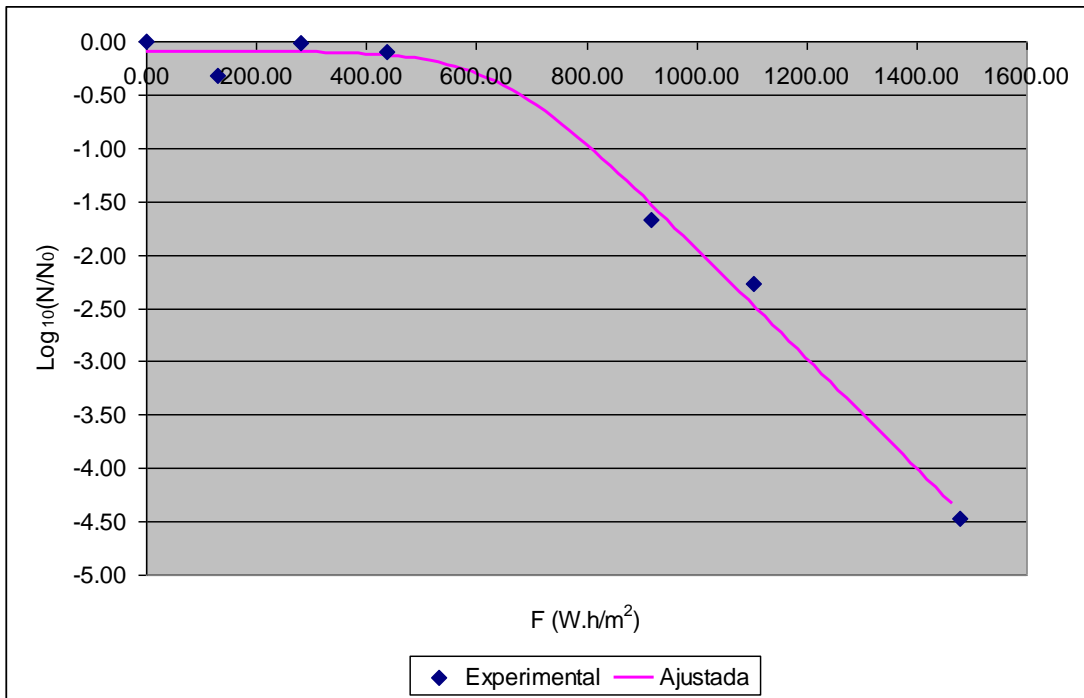


Figura 63. Cinética de inactivación, Los Dormidos, coliformes totales, PET ½ negro 55°C.

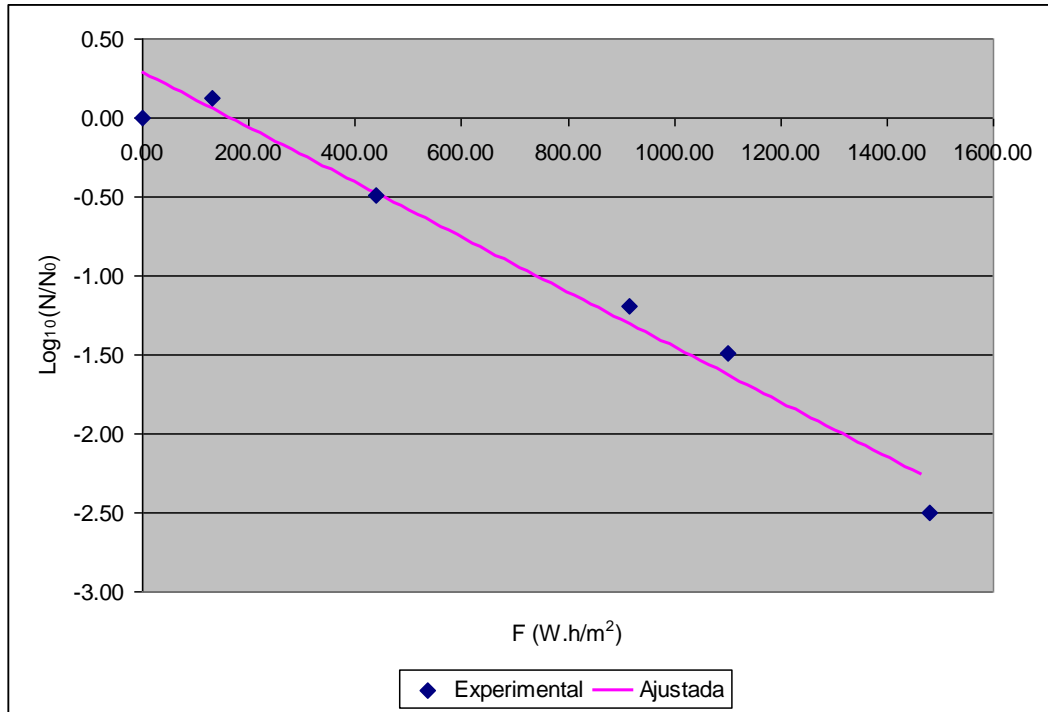


Figura 64. Cinética de inactivación, Los Dormidos, *Escherichia coli*, PET transparente, 44°C.

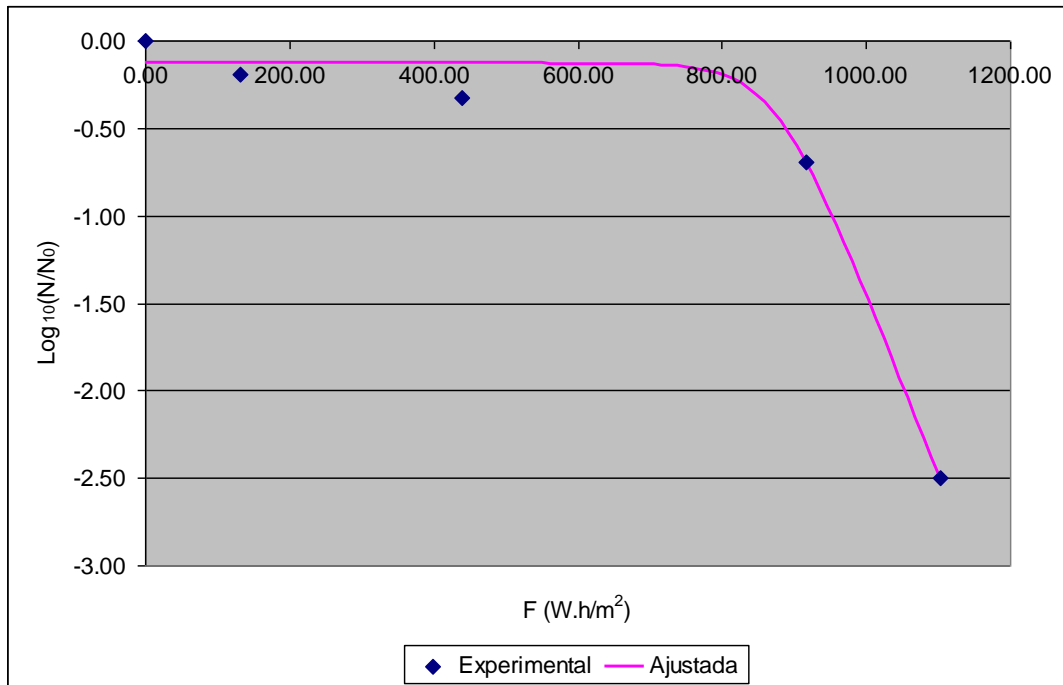


Figura 65. Cinética de inactivación, Los Dormidos, *Escherichia coli*, PET ½ negro, 55°C.

Al calcular los valores de la dosis de radiación, se observa que los resultados son consistentes con los del laboratorio; la dosis disminuye con el incremento de la temperatura (tabla 23).

Tabla 23. Valores de k y $F_{99.9\%}$ para el agua de abastecimiento en la comunidad.

Microorganismo	PET	k (m^2/W)	R	F_s ($W.h/m^2$)	$F_{99.9\%}$ ($W.h/m^2$)	$F_{99.9\%} + F_s$
<i>Coliformes totales</i>	Transparente T=44°C	0.010	0.980	677	691	1368
	½ Negro T= 55°C	0.012	0.996	643	576	1218
<i>Escherichia coli</i>	Transparente T=44°C	0.004	0.982		1727	
	½ Negro T= 55°C	0.024	0.992	876	288	1164

k = velocidad de inactivación; R= Coeficiente de regresión; F_s = Dosis umbral (hombro); $F_{99.9\%}$ = Dosis para inactivar 3 log; $F_{99.9\%} + F_s$ = dosis total.

Esto también se observa en la figura 66, donde las dosis son mayores para el pet transparente para coliformes totales y *Escherichia coli* para los dos tipos de pet, esto concuerda con los resultados de laboratorio, la influencia de la temperatura es significativa sólo arriba de 50°C.

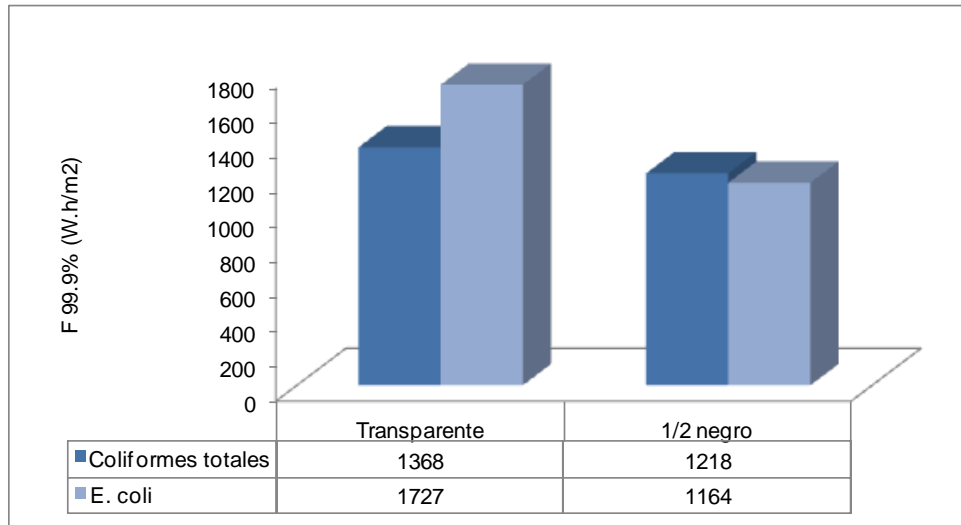


Figura 66. Dosis de radiación para inactivar al 99.9% de coliformes totales y *Escherichia coli*.

Al analizar la contribución de la radiación y la temperatura, en la figura 67 se observa que las diferencias son mínimas para cada efecto, aunque aparentemente la combinación de radiación + temperatura tiene la mayor inactivación y la tendencia es la misma que en la prueba de laboratorio. Las diferencias entre cada tratamiento son menores tal vez por el número de microorganismos de prueba ya que los demás parámetros son similares.

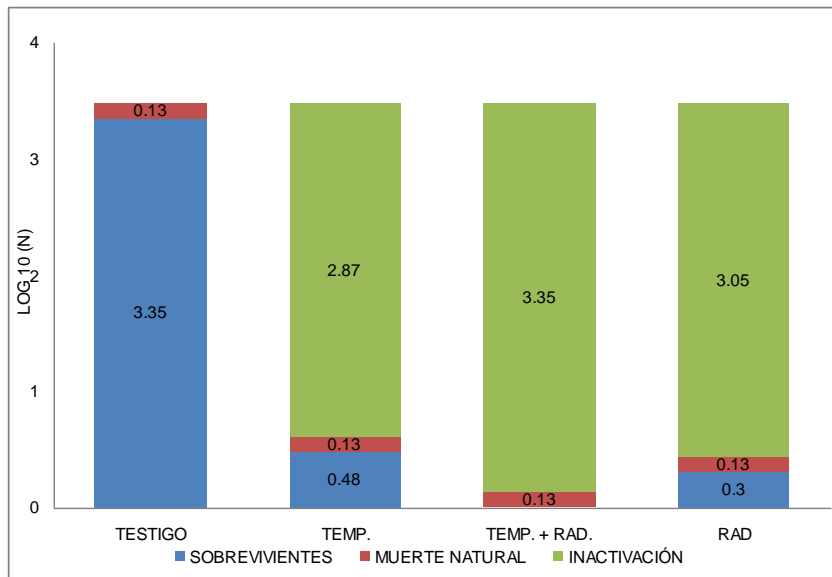


Figura 67. Efecto de la radiación, temperatura y radiación+temperatura para coliformes totales, radiación promedio 723 W/m². Los Dormidos.

7.3.3 Pruebas de recrecimiento en la comunidad

En la primera prueba, con las condiciones menos favorables (2117 W/m²), los coliformes totales no fueron completamente eliminados, motivo por el cual hay crecimiento a través del tiempo de almacenamiento (Fig. 68).

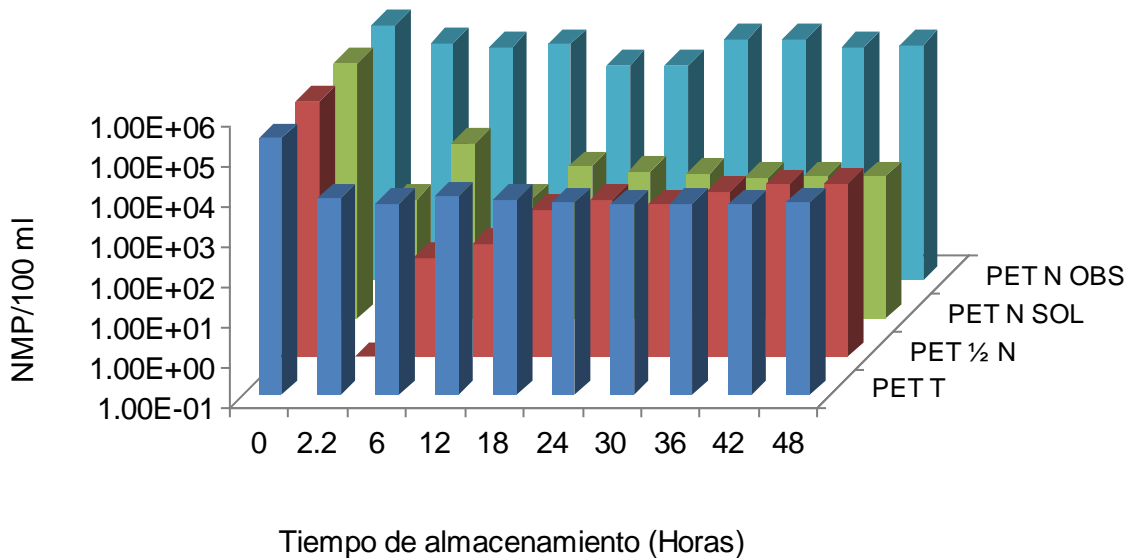


Figura 68. Recrecimiento de coliformes totales en agua de la fuente de Los Dormidos (2117 W/m²).

Escherichia coli fue removida en su totalidad dentro de este tiempo de exposición en el PET medio negro y transparente. Al igual que en los resultados de laboratorio, la radiación ejerce el mayor daño sobre los microorganismos, así en el Pet transparente no se observó recrecimiento dentro del tiempo de almacenamiento, en tanto que en el Pet medio negro se presentó una ligera recuperación bacteriana (Fig. 69).

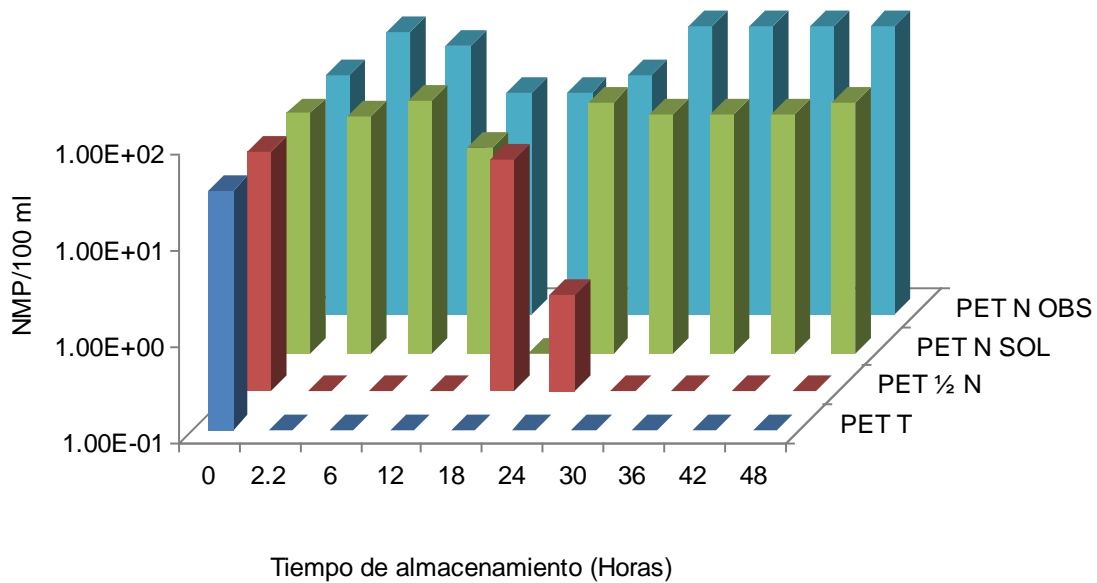


Figura 69. Recrecimiento de *Escherichia coli* en agua de la fuente de Los Dormidos. (2117 W/m²).

Debido a que los resultados de campo han sido consistentes con los obtenidos en el laboratorio, en donde ya se probó que menos de tres horas de exposición no son suficientes para impedir el recrecimiento, se realizaron dos pruebas con cuatro horas de exposición, en un día soleado y despejado. El resultado es satisfactorio, ya que no hubo recrecimiento de coliformes totales y *Escherichia coli*, en el PET transparente y medio negro, aún después de cinco días de almacenamiento (figs. 70 y 71). En este caso la temperatura influyó en buena medida, ya que el Pet negro expuesto al sol tampoco presentó recrecimiento.

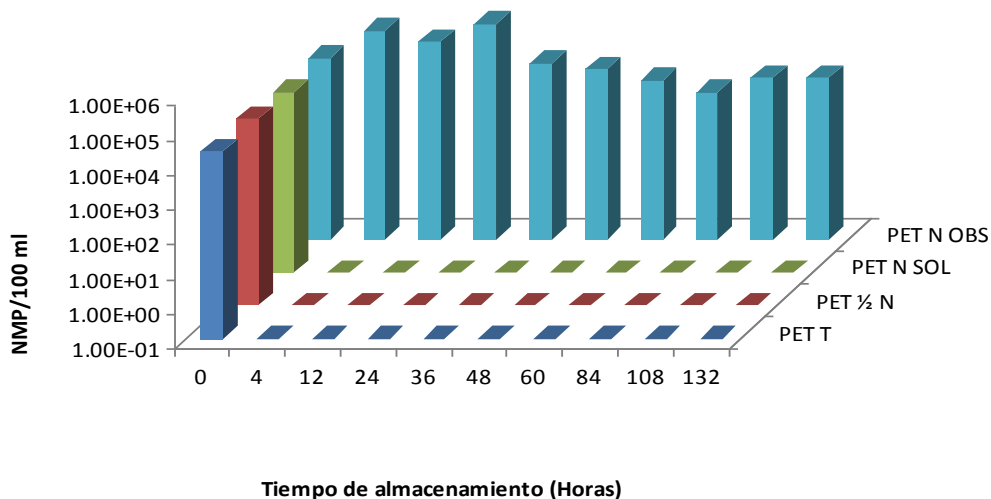


Figura 70. Recrecimiento de coliformes totales en agua de la fuente de Los Dormidos (3272 W/m²).

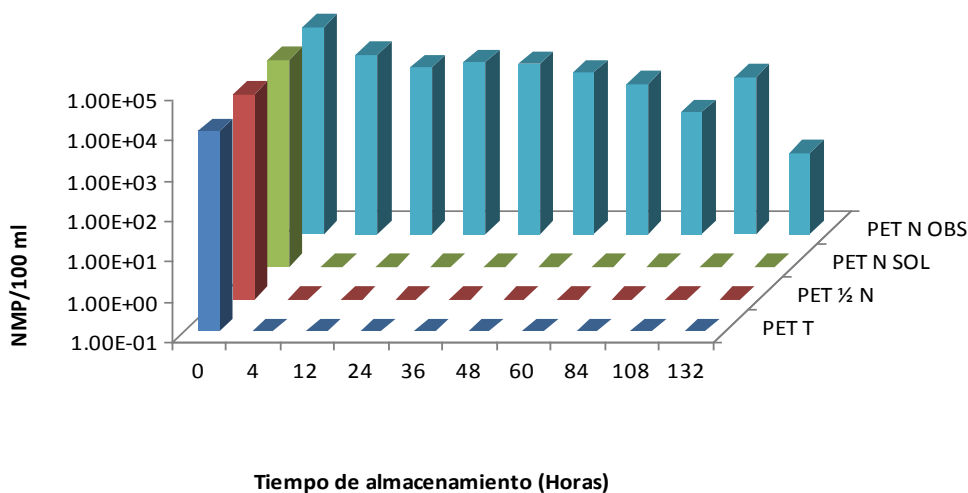


Figura 71. Recrecimiento de Escherichia coli en agua de la fuente de Los Dormidos (3272 W/m²).

Se efectuaron otras pruebas de calidad bacteriológica de la fuente en octubre, y se detectaron prácticamente las mismas especies que en el muestreo inicial: *Aeromonas hydrophila* gr, *Chryseomona luteola*, *Providencia rettgeri*, *Pseudomonas aeruginosa*, *Enterobacter sakazakii*, *Pseudomonas fluorescens/putida*, *Serratia liquefaciens*, *Bordetella/Alc.*, *Moraxella* spp. y *Enterobacter aerogenes*.

Los resultados en pruebas controladas en laboratorio y en campo muestran que el método es técnicamente factible, que mejora significativamente la calidad bacteriológica del agua, en términos de la eliminación de bacterias de origen fecal, y con esto puede contribuir a abatir la incidencia de diarreas bacterianas, pero no se

obtiene agua estéril o completamente libre de microorganismos por lo que es mejor exponer el agua durante todo el día a las radiaciones, esto si asegura que los patógenos incluida *Salmonella* se inactivarán.

7.3.4 Resultados de las pruebas de desinfección solar con la población.

Los resultados fueron variados, hay ocasiones en que las muestras no presentan contaminación y en otras, el agua mantiene casi la misma calidad microbiológica del agua de la fuente de abastecimiento; entre las principales causas se puede contar la falta de limpieza de las botellas, no exponer las botellas por más de cuatro horas así como la ubicación y mantenimiento inadecuados del concentrador.

El primer día la prueba dio muy buenos resultados, debido a que el personal del Instituto orientó los concentradores y colocó las botellas desde la mañana y fue un día soleado: la radiación acumulada fue de 6 242 W/m², asumiendo que los niveles de radiación en el sitio de trabajo, son semejantes a los del IMTA. En este muestreo se logró la inactivación total de coliformes totales y *Escherichia coli* en todas las botellas expuestas como se observa en la figura 72. También se observa que el agua que almacenan para consumo en la vivienda (Recipiente), presenta el mismo nivel de contaminación que la fuente de abastecimiento, por lo que se les pide a los usuarios no trasvasar el agua, sino utilizarla sirviendo directamente de la botella para evitar su recontaminación.

A partir del segundo muestreo los usuarios aplicaron el método de desinfección solar y guardaron las botellas para tomar la muestra al día siguiente. Los resultados variaron aún para las botellas colocadas por el mismo usuario (Figura 73); se observó que *Escherichia coli* se inactivó totalmente en dos de tres muestras y los coliformes totales se inactivaron en una muestra; esta variación indica que las botellas no recibieron la misma dosis de radiación solar, por lo que se les indicó nuevamente la manera correcta de colocar los concentradores.

Para el tercer y cuarto muestreo, todas las muestras siguieron la misma tendencia, se inactivó completamente *Escherichia coli* pero no los coliformes totales (Figs. 74 y 75). Esto significa que los concentradores se orientaron adecuadamente, pero la dosis de radiación no fue la adecuada para inactivar los coliformes totales, que como se observó en las cinéticas de inactivación, son más resistentes que *Escherichia coli* a la radiación solar.

En el quinto y sexto muestreo se volvieron a observar inconsistencias en los resultados (Figs. 76 y 77), se obtuvo la inactivación total de coliformes totales y *Escherichia coli* en algunas botellas y en otras no se observó ningún efecto, al mantener casi la misma concentración que en el agua de la fuente de abastecimiento. Esto indica que no se colocaron adecuadamente los concentradores, y en el caso del usuario 3 en la figura 77, éste refirió haber retirado la botella antes del medio día.

En general, hubo mayor inactivación de *Escherichia coli* que para los coliformes totales en los diferentes muestreos, lo cual es consistente con los resultados de laboratorio. Por tanto, si se monitorea la desinfección solar utilizando como

indicadores de contaminación a los coliformes totales, se asegura inactivación de la contaminación fecal.

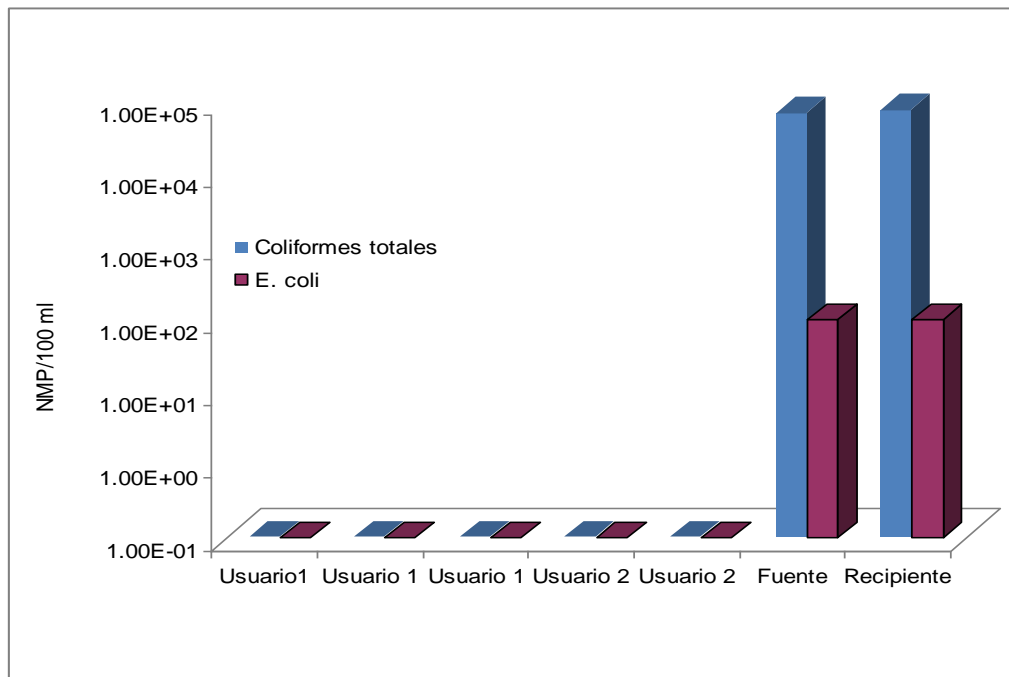


Figura 72. Resultados del primer muestreo en la comunidad.

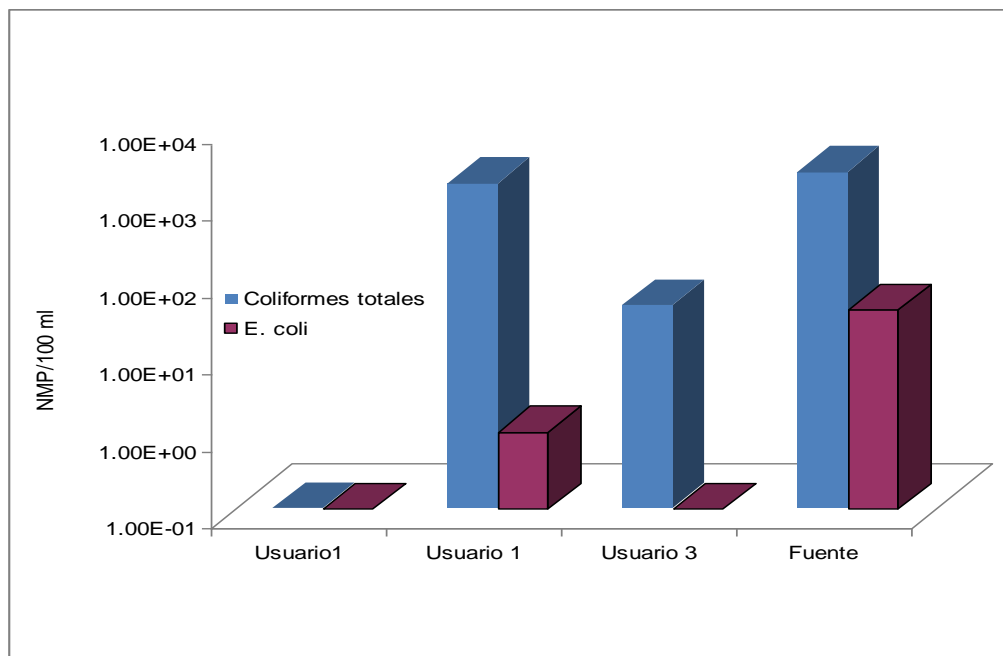


Figura 73. Resultados del segundo muestreo en la comunidad.

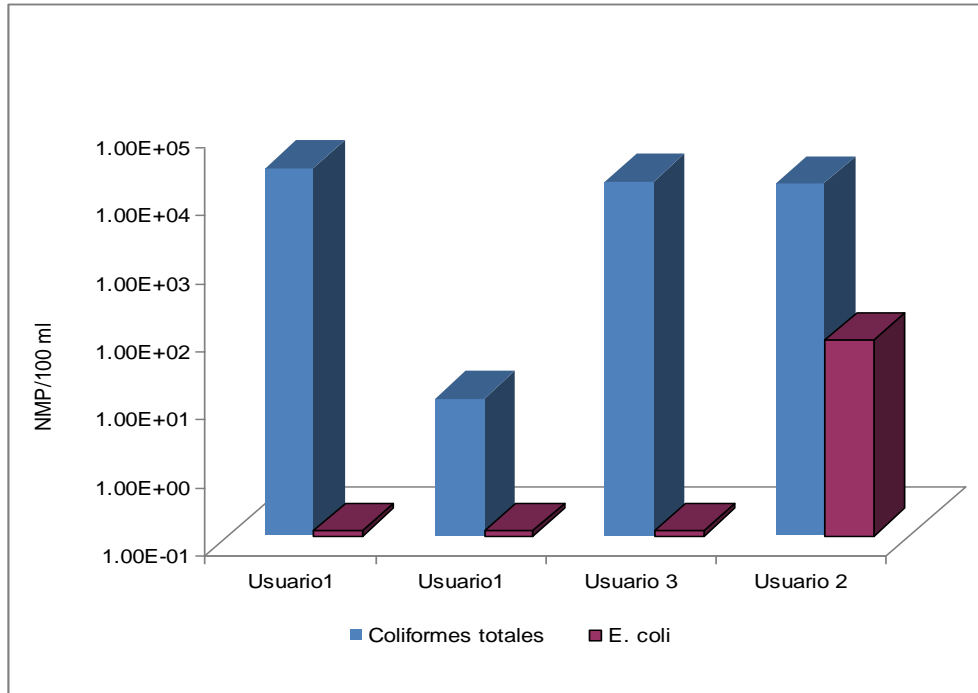


Figura 74. Resultados del tercer muestreo en la comunidad.

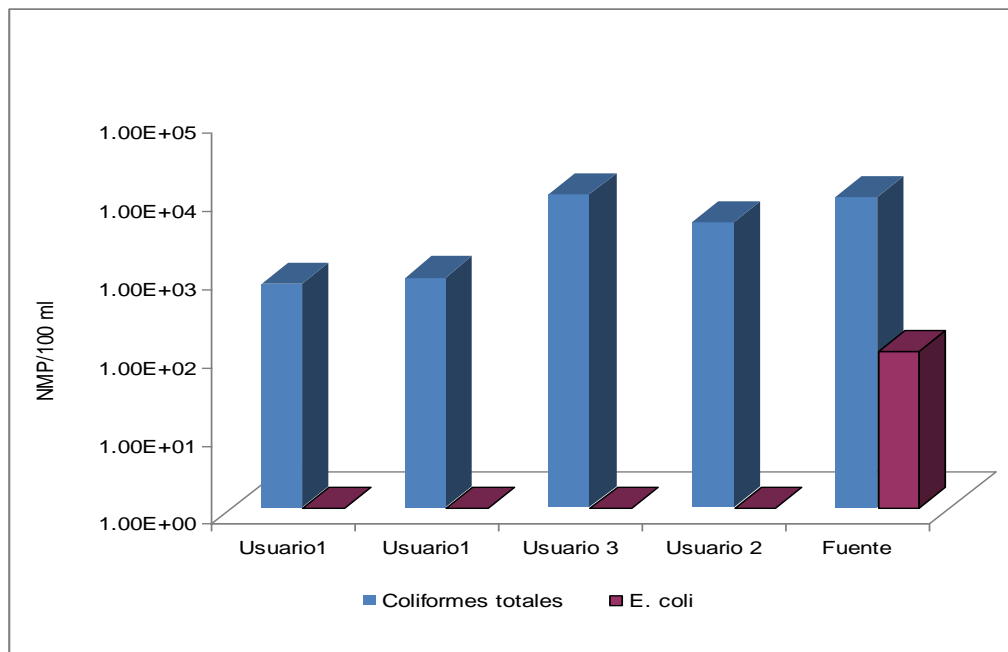


Figura 75. Resultados del cuarto muestreo en la comunidad.

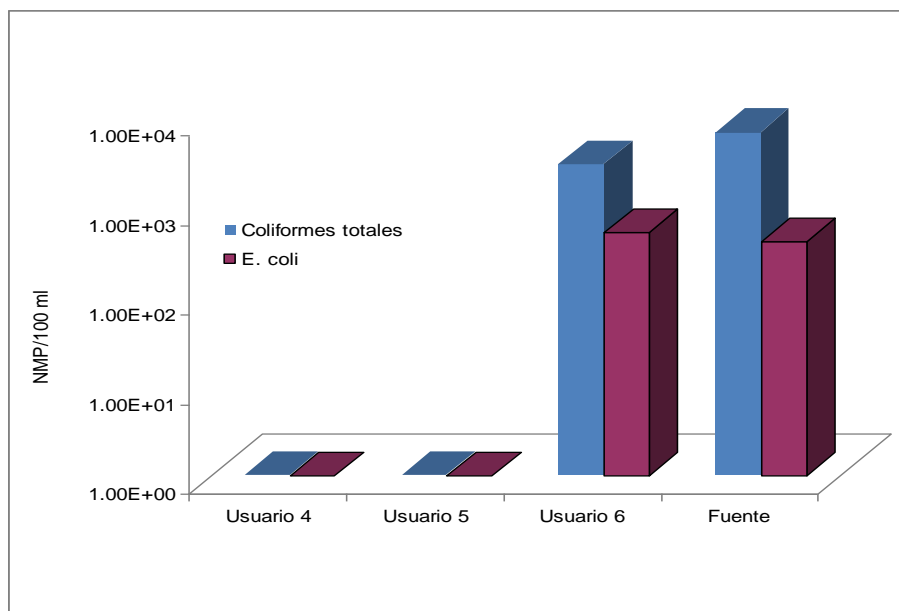


Figura 76. Resultados del quinto muestreo en la comunidad.

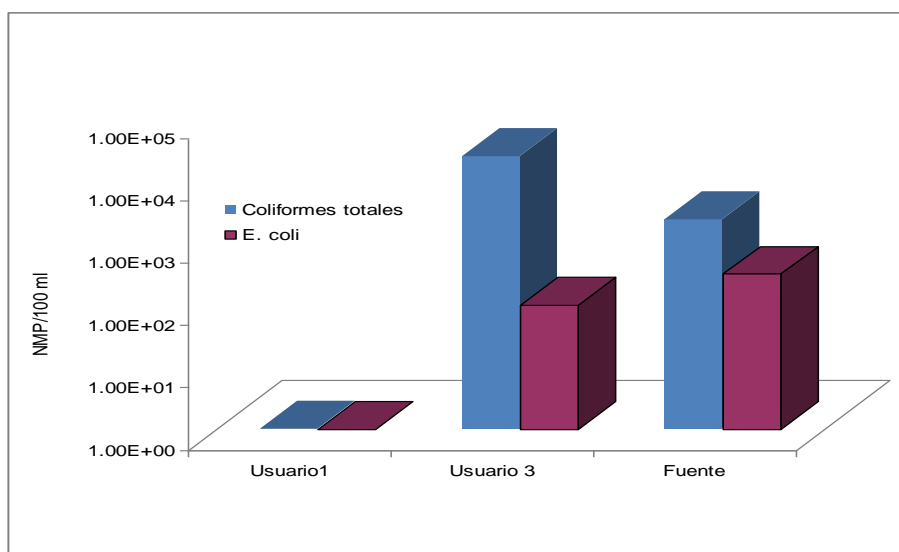


Figura 77. Resultados del sexto muestreo en la comunidad.

Es importante señalar que se obtuvo mayor participación de las mujeres, dos hombres iniciaron pero abandonaron el método. Tres meses después, dos de las seis familias, continuaban desinfectando el agua con radiación solar. Los resultados de las muestras fueron similares a los que se obtuvieron cuando no se orienta adecuadamente el concentrador o las botellas no se exponen todo el día: en dos botellas de inactivaron totalmente los coliformes totales y *Escherichia coli*, pero en las cuatro restantes sólo se inactiva *Escherichia coli*. Se les indicó nuevamente cómo colocar el concentrador. Para la siguiente visita, los resultados mostraron que se utilizó el método de manera adecuada ya que se inactivaron los coliformes totales y *Escherichia coli* en todas las muestras. Esto demuestra que al aplicar la desinfección solar adecuadamente, se mejora la calidad bacteriológica del agua y por tanto, la probabilidad de encontrar un patógeno disminuye.

8 CONCLUSIONES

Los resultados son consistentes con las cinéticas de otros estudios, siguen un comportamiento de primer orden, con variación en la velocidad de inactivación k , por efecto de la temperatura y con el efecto de “hombros” cuando la intensidad de radiación disminuye.

Las cinéticas de inactivación por radiación solar siguen un comportamiento de primer orden, con la velocidad más alta para *Vibrio cholerae O1 Inaba* en botella transparente y una radiación promedio de 747.68 W/m² (radiación global); la más lenta fue para coliformes totales en botella transparente con radiación promedio de 505.19 W/m².

Cuando la radiación fue menor a 3000 W.h/m², algunas cinéticas presentaron el efecto de demora (hombro), es decir, requirieron de una dosis umbral para iniciar la inactivación. Este comportamiento se observa bajo condiciones poco favorables de radiación y temperatura ya que los microorganismos necesitan una energía mínima para que la radiación solar pueda dañarlos, como lo sugiere el mecanismo de objetivos múltiples, mediante el cual un organismo que contiene n sitios definidos (la membrana, el ADN, ó daño indirecto por especies de oxígeno reactivas), debe recibir al menos un ataque en cada uno de ellos para que la célula sea inactivada.

La eficiencia de inactivación se incrementó con el aumento de la temperatura en el caso de los coliformes y *Salmonella typhi*, reduciendo la dosis de radiación a la mitad, por el contrario, en el caso de *Enterococcus* y *Vibrio cholerae* se observó que el efecto principal se debe a la radiación solar y que el incremento de la temperatura en la botella ½ negra no mejora el proceso.

El incremento de la temperatura es proporcional a la intensidad de la radiación solar, por lo que si ésta disminuye, además de disminuir la temperatura, también es menor la radiación UVA y visible hacia los microorganismos, disminuyendo así la eficiencia en la inactivación microbiana ya sea por calor, por radiación o por el efecto combinado. Por esto, se ha notado que el efecto sinérgico se presenta cuando se incrementa la temperatura a más de 40°C En el presente estudio, el efecto sinérgico se observó con temperatura superior a 50°C.

La dosis de radiación mínima para la inactivar 3log₁₀ de los microorganismos presentó el siguiente orden: *Vibrio cholerae O1*<*Salmonella typhi*<*Escherichia coli*<*Enterococcus faecalis*<coliformes totales< *Salmonella arizonae*. Este resultado sugiere que es más conveniente utilizar a los coliformes totales como indicadores de eficiencia de desinfección solar, para la inactivación de coliformes fecales y por bacterias enteropatógenas (con excepción de *Salmonella arizonae*).

La inactivación con los microorganismos de prueba a excepción de *Salmonella arizonae* parecen alentadores; sin embargo, es necesario determinar si se sobreestimó la eficiencia bactericida de la radiación solar, con los métodos utilizados para la detección y cuantificación de microorganismos sobrevivientes.

Sin excepción, las bacterias de prueba mostraron tener mecanismos de reparación de daño, que les permiten sobrevivir y multiplicarse, aún en condiciones de

inactivación, si las dosis de radiación son menores a 3000 W.h/ m² que corresponden a aproximadamente 4 horas de exposición con una radiación promedio de 700 W/m².

Los resultados en campo para las cinéticas de inactivación son consistentes con las pruebas en laboratorio; tanto para coliformes totales como para *Escherichia coli* se observó un comportamiento de primer orden para la cinética de inactivación, con incremento en la velocidad por efecto de la temperatura. En las pruebas de recrecimiento, con las condiciones menos favorables (2117 W.h/m²) los coliformes no fueron completamente eliminados, motivo por el cual hay crecimiento a través del tiempo de almacenamiento; con las condiciones favorables (3272 W.h/m²), el resultado es satisfactorio, ya que no hubo recrecimiento de coliformes totales y *Escherichia coli*, en el PET transparente y ½ negro, aún después de cinco días de almacenamiento.

Aunque los resultados de la desinfección por familias de la comunidad variaron por deficiencias en la operación del concentrador y las botellas, se logra la inactivación de *Escherichia coli* en 17 de 21 muestras. Esto demuestra que se mejora la calidad bacteriológica del agua y por tanto, se disminuye la probabilidad de encontrar un patógeno. La participación en la aplicación del método fue de mujeres y dos de ellas le dieron continuidad a la desinfección solar; se observaron las limitaciones que tiene cualquier otro método de desinfección: los usos y costumbres de la comunidad.

9 RECOMENDACIONES

a) En la comunidad:

No se recomienda utilizar las botellas pintadas a la mitad de negro ya que sólo en días de muy alta insolación se obtiene un incremento de la temperatura mayor a 50°C con lo que se obtiene un efecto sinérgico con la radiación.

Se recomienda que las botellas sean expuestas durante todo el día, con el objeto de que reciban la mayor cantidad de radiación posible, para eliminar la totalidad de los organismos de origen fecal y los patógenos.

No se recomienda almacenar el agua por períodos de tiempo superiores a las 24 horas, para evitar el posible recrecimiento de bacterias.

Aunque existe la factibilidad técnica para aplicar la desinfección solar, es necesario capacitar y acompañar a las familias durante la transferencia de la tecnología para que apliquen el método adecuadamente, también se les debe concientizar acerca de los beneficios a la salud por contar con agua para consumo con la calidad microbiológica adecuada.

b) Para el seguimiento de la calidad del agua:

Para este procedimiento de desinfección, *Salmonella* podría ser un buen indicador de la efectividad; sin embargo, debido a la variación en los resultados, se considera que es mejor utilizar coliformes totales como indicador de eficiencia de desinfección solar y no a *Escherichia coli* que es más sensible a la radiación.

c) En investigación

Es necesario probar, adaptar y desarrollar métodos de cultivo para la determinación de microorganismos dañados.

Se sugiere realizar pruebas con protozoarios parásitos y algunos enterovirus de origen fecal, que sean menos susceptibles a las radiaciones las bacterias.

Para que haya factibilidad técnica de aplicación, el agua debe cumplir con los criterios y normas de calidad, en cuanto a los parámetros fisicoquímicos y bacteriológicos para asegurar que se proporciona agua desinfectada sin peligro de patógenos y agentes tóxicos. Existen pocos estudios sobre los fotoproductos del PET y su toxicidad, por lo que se recomienda evaluar el efecto de la migración de fotoproductos del PET y determinar su efecto a la salud.

BIBLIOGRAFÍA:

Acra, A., Raffoul, Z., Karahagopian, Y. (1984) Solar Disinfection of Drinking Water and Oral Rehydration Solutions. [en línea] Guidelines for Household Application in Developing Countries UNICEF, Paris, France. Disponible en <<http://almashriq.hiof.no/lebanon/600/610/614/solar-water/unesco/>>

Consultado el: 10-03-2008.

Acra, A., Jurdi, M., Mu'Allem, H., Karahagopian, Y., Raffoul, Z., '(1990) Water Disinfection by Solar Radiation, Assessment and Application [en línea], Technical Study 66e. Disponible en <http://www.idrc.ca/library/document/041882/>. IDRC Library: Documents, Ottawa, Canada, 1998. Consultado el: 10-03-2008.

Adur J.F. (2004). Radiaciones no-ionizantes. [en línea] Tema 7. Disponible en <<http://www.bioingenieria.edu.ar/academica/catedras/radiaciones/tema7.pdf>>

Consultado el: 10-03-2008

Almanza R, Muñoz F. (1994). Ingeniería de la energía solar. El colegio Nacional.

Berney, M., H. U. Weilenmann, A. Simonetti, and T. Egli. (2006b). Efficacy of solar disinfection of *Escherichia coli*, *Shigella flexneri*, *Salmonella typhimurium* and *Vibrio cholerae*. J. Appl. Microbiol. Vol. 72, No.4, p.2586-2593.

Berney, M., H. U. Weilenmann, Ihssen J., Bassin C. and T. Egli. (2006a). Specific growth rate determines the sensitivity of *Escherichia coli* to thermal, UVA, and solar disinfection. J. Appl. Microbiol. Vol.101, p.828-836.

Boyle M., Sichel C., Fernández-Ibáñez P., Arias-Quiroz G. B., Iriarte-Puña M., Mercado A., Ubomba-Jaswa E., and. McGuigan K. G. (2008). Bactericidal Effect of Solar Water Disinfection under Real Sunlight Conditions. J. Appl. Microbiol. Vol. 74, No. 10, p. 2997-3001.

Brock, T. D., D. W. Smith y M. T. Madigan. (1987). Microbiología. 4a. edición. Prentice-Hall Hispanoamericana, S. A. México.

Brooks, G., Butel, J, Jawetz, E., Melnick, J., Orstin, N., Adelberg, E. (1996). Microbiología Médica. El manual Moderno, México. p. 110-111.

Bryan, A., Bryan, Ch.G. (1976). Bacteriología. Principios y Prácticas. CECSA, México. p. 125-139.

Chang, J. C., Ossof, S.F., Lobe, D. C., Dorfman, M., Dumis, C. Qualls, R. And Johnson J. (1985). UV inactivation of pathogenic and indicator microorganismos. Appl. Environ. Microbiol. Vol.49, p. 1361-1365.

Ciochetti, D. And Metcalf, R. (1984). Pasteurization of natural contaminated water with solar energy. Appl. Environ. Microbiol. Vol.47, p. 223-228.

Comisión Nacional del Agua (2001). Plan Nacional Hidráulico, 2001-2006. México, 2001.

Comisión Nacional del Agua. (2007). Situación del Subsector Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento 2007. [en línea]. Publicaciones 2007. Disponible en <<http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Noticias/Subsector2007>> Consultado el: 20-09-2008.

Consejo Nacional de Población. (2005). Índice de marginación a nivel localidad 2005. [en línea] < <http://www.conapo.gob.mx/publicaciones/indice2005xloc.htm>> Consultado el: 15-04-2008

Consejo Nacional de Población. (2006). Base de datos del IDH municipal.[en línea] < <http://www.conapo.gob.mx/00cifras/6c.htm>> Consultado el: 15-04-2008.

Conroy, R. M., Meegan, M., Joyce, T., McGuigan, K. G. and Barnes, J. (1996). Solar disinfection of drinking water and diarrhoea in Maasai children: a controlled field trial. *Lancet*. Vol. 348, p. 1695-1697.

Conroy, R. M., Meegan, M., Joyce, T., McGuigan, K. G. and Barnes, J. (1999). Solar disinfection of water reduces diarrhoeal: an update. *Arch dis Child*. Vol.81, p. 337-338.

Dejung S., Fuentes I., Almanza G., Jarro R., Navarro L., Arias G., Urquieta E., Torrico A., Fenandez W., Iriarte M., Birrer C., Stahel W. A. and Wegelin M. (2007). Effect of solar water disinfection (SODIS) on model microorganisms under improved and field SODIS conditions. *Journal of Water Supply*. Vol. 56, No. 4, p. 245-256.

DuPont H. L. (1992) Enteropathogens in: *encyclopedia of Microbiology*, Vol.2. Academic Press, Inc. p. 63-68.

Fujioka, R. S.; Hashimoto, H. H.; Siwak, E. B. ; Reginald, H. F. (1981) Effect of sunlight on survival of indicator bacteria in seawater. *Appl. & Env. Microbiol*. Vol.41, No.3, p. 690-696.

Gaudy A. F. and Gaudy, E. T., (1980), *Microbiology for Environmental Scientists and Engineers*. Mc Garw Hill Book Co., New York, 73.

Geeraerd, A. H., C. H. Herremans, and J. F. Van Impe. (2000). Structural model requirements to describe microbial inactivation during a mild heat treatment. *Int. J. Food Microbiol*. Vol.59, p.185-209.

Geeraerd, A. H., V. P. Valdramidis, and J. F. Van Impe. (2005). GInaFit, a freeware tool to assess non-log-linear microbial survivor curves. *Int. J. Food Microbiol*. Vol.102, p.95-105.

González D. C. (2004). La desinfección y el almacenamiento domiciliario del agua: intervención fundamental en la salud pública.[en línea] Reporte Técnico de vigilancia. Vol. 9, No. 4. ISSN 1028-4362. Cuba. Disponible en < <http://www.bvs.sld.cu>> Consultado el: 15-09-2008.

Gray N.F. (1999). Water Technology. An Introduction for Environmental Scientists and Engineers. Edit. Arnold Publishers. ISBN 0340 67645 0. Great Britain.p. 251-281.

Hooper G. (1987). Chemical Disinfection in Handbook of water purification. Second ed. Ellis Horwood series in water and wastewater technology. Chichester, Inglaterra.

Hosseini A. (2007). Feasibility of solar energy in disinfection of drinking water in Iran. American-Euroasian J. Agric. & Environ. Sci. Vol. 2, No. 4, p. 407-410.

Hurst C., Knudsen G., McInerney M., Stetzenbach L., Walter M. (1997). Manual of Environmental Microbiology. American Society for Microbiology. Washington, D.C.

Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. II Conteo de Población y Vivienda 2005 [en línea]. <<http://www.inegi.gob.mx>>. Consultado el: 15-04-2008.

Joyce, T., McGuigan, K., Meegan, M., and Conroy, R. (1996). Inactivation of fecal bacteria in drinking water by solar heating. Applied and Environmental Microbiology. Vol.62, p. 399-402.

Khaengraeng, R., and R. H. Reed. (2005). Oxygen and photoinactivation of *Escherichia coli* in UVA and sunlight. J. Appl. Microbiol. Vol.99 p.39-50.

Kholler M. (2003). Report 429670: Migration of organic components from polyethylene terephthalate (PET) bottles to water. Swiss Federal Laboratories for Materials testing and Research, for Meierhofer and Wegelin. Dübendorf, Switzerland.

LeChevallier M. and Kwok-Keung. (2004) *Water Treatment and Pathogen Control: Process Efficiency in Achieving Safe Drinking Water*. World Health Organization.. ISBN: 1 84339 069 8. Published by IWA Publishing, London, UK.

Margolin, A. (1997). Control of microorganisms in source water and drinking water. In: Manual of Environmental Microbiology. Ed. Hurst, C., Knudsen, G., McInerney, M., Stetzenbach, L. And Walter, M. American Society for Microbiology. pp 195-202.

Márquez-Bravo L.G. [en línea] Solar disinfection. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Disponible en: <<http://www.cepis.ops-oms.org/eswww/caliagua/simposio/enwww/ponencia/ponen14.doc>> Consultado el: 10-03-2008.

Martín- Domínguez A.; Cortés-Muñoz J. E.; Ramírez-Angulo V.; Martínez-Rodríguez M. (1999). Desinfección de agua por radiación solar. Informe final. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.

McGuigan, K., Joyce, T., Conroy, R., Gillespie, J., and Meegan, M. (1998). Solar disinfection of drinking water contained in transparent plastic bottles: characterizing the bacterial inactivation process. J App Microbiol. Vo.84, p. 1138-1148.

Meera V., M.M. Ahammed. (2008). Solar disinfection for household treatment of roof-harvested rainwater. *J. Water Science & Technology, Water Supply*. Vol. 18, No. 2, p. 153-160.

Meierhofer, R. & Wegelin, M. (2002). *Solar Water Disinfection –a guide for the application of SODIS*. Swiss Federal Institute of Environmental Science and Technology (EAWAG/SANDEC), Switzerland.

Mietinnen, I., Vartiainen, T., and Martikainen, P. (1997). Phosphorus and bacterial growth in drinking water. *Applied and Environmental Microbiology*. Vol.63, p. 3242-3245.

Moe C. L. (1997) *Waterborne transmission of infectious agents in: Manual of Environmental Microbiology*. American Society for Microbiology. Washington, D.C.

OMS/UNICEF (2007). La meta de los ODM relativa al agua potable y el saneamiento: el reto del decenio para zonas urbanas y rurales. [en línea] <http://www.who.int/water_sanitation_health/monitoring/jmp2006/es/index.html> Consultado el: 15-09-2008.

Örnuc, M., Becker, D., Ragsdale, S., and Sancar, A. (1998). Nucleotide excision repair in the third kingdom. *Journal of Bacteriology*. Vol.180, p.5796-5798.

Presidencia de la República. (2006). Sexto informe de gobierno. [en línea] <<http://www.sexto.informe.fox.presidencia.gob.mx/>> Consultado el: 15-04-2008.

Reche, I., Pace, M. L., and Cole, J. J. (1998). Interaction of photobleaching and inorganic nutrients in determining bacterial growth on colored dissolved organic carbon. *Microbial Ecology*. Vol. 36, p. 270-280.

Reed, R. (1997). Solar inactivation of faecal bacteria in water: the critical role of oxygen. *Lett Appl Microbiol*. Vol. 24, p. 276-280.

Reed, R. H. (1997a) Solar inactivation of faecal bacteria in water: the critical role of oxygen. *Letters in Appl. Microbiol*. Vol. 24, p.1-5.

Reynolds T.D. (1982). *Disinfection in Unit Operations and processes in environmental engineering*. PWS Publishing company, USA, p. 523-539.

Secretaría de Salud. (2000) *Modificación a la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994, "Salud Ambiental, Agua Para Uso y Consumo Humano-Límites Permisibles de Calidad y Tratamientos a que Debe Someterse el Agua para su Potabilización"*.

Secretaría de Salud/Dirección General de Epidemiología (2007). *Anuarios de morbilidad [en línea]. Información Epidemiológica*. <<http://www.dgepi.salud.gob.mx/infoepi/index.htm>> Consultado el: 15-09-2008.

Secretaría de Salud. Dirección General de Epidemiología (2005). Anuarios de mortalidad. [en línea]. Publicaciones. <<http://sinais.salud.gob.mx/publicaciones/>> Consultado el: 15-09-2008.

Sepúlveda J., Bustreo F., Tapia R., Rivera J., Lozano R., Olaiz G., Partida V., García-García M.L., Valdespino J.L. (2007). Aumento de la sobrevida en menores de cinco años en México: La estrategia diagonal. *Salud Pública de México*, Vol. 49, supl. 1, p. S110-S125.

Sichel, C., J. Blanco, S. Malato, and P. Fernández-Ibáñez. (2007). Effects of experimental conditions on *Escherichia coli* survival during solar photocatalytic water disinfection. *J. Photochem. Photobiol. B Chem.* Vol. 189, p.139–246.

Siriwong C., Holasut K. (2006). The coupling effect between heat and UV irradiation in the solar disinfection for drinking water in the PET bottles. *Technology and Innovation for sustainable Development Conference*. Faculty of Engineering, Khon Kaen University, Thailand. 25-26 January 2006.

Sobsey M.D., Linden, K.G., G.A. Shin, G. Faubert (2002) UV disinfection of *Giardia lamblia* cysts in water. *Environ. Sci. Technology*. Vol. 36, No.11, p. 2519-22.

Solsona F., Méndez J.P. (2003) Water Disinfection. [en línea] CEPIS-PAHO/WHO. Disponible en: <<http://www.cepis.ops-oms.org>> Consultado el: 15-09-2008.

Slieman, T., Nicholson, W. (1999). Artificial and solar UV radiation induces strand breaks and cyclobutane pyrimidine dimers en *Bacillus subtilis* spore DNA. *Applied an Environmental Microbiology*. Vol. 66, p. 199-205.

Smith, R. J., Kehoe, S. C., McGuigan, K. G. & Barer, M. R. (2000) Effects of simulated solar disinfection of water on infectivity of *Salmonella typhimurium*. *Letters in Appl. Microb.* Vol.31, p. 284–288.

Toranzos, G., and Mcfeters, G. (1997). Detection of indicator microorganisms in environmental freshwater and drinking waters. In: *Manual of Environmental Microbiology*. Ed. Hurst, C., Knudsen, G., McInerney, M., Stetzenbach, L. And Walter, M. American Society for Microbiology. p. 184-194.

Tortora, G.J., Funke, B.R. & Case, C.L. (1989). *Microbiology. An Introduction*. 3ª edición. The Benjamin/Cumming publishing Co. USA. pp. 167-189

Ubomba-Jaswa E., Navnoft C., Polo-López I., Fernández-Ibáñez P., McGuigan K.G. (2009). Solar disinfection of drinking water (SODIS): an investigation of effect of UV-A dose on inactivation efficiency. *Photochemical & Photobiological Sciences*. DOI:10.1039/b816593a.

United States Environmental Protection Agency (USEPA). (1999) *Microbial and Disinfection Byproduct Rules Simultaneous Compliance Guidance Manual*.

Wegelin, M., Canonica, S., Alder, A. C., Marazuela, D., Suter, J.-F., Bucheli, Th. D., Haefliger, O. P., Zenobi, R., McGuigan, K. G., Kelly, M. T., Ibrahim, P. & Larroque, M.

(2001) Does sunlight change the material content of polyethylene terephthalate (PET) bottle? J. Water SRT-Aqua. Vol. 50, No. 3, p. 125–133.

Wegelin, M., Canonica, S., Mechsner, K., Fleischman, T., pesaro, F., and Metzler, A. (1994). Solar water disinfection: scope of the process and analysis of radiation experiments. J. Water SRT-Aqua. Vol. 43, p. 154-169

Witt M.V., Reiff M. F. (1993). La desinfección del agua a nivel casero en zonas urbanas marginales y rurales. CEPIS-OMS, Washington, D.C.

WHO/UNICEF. (2004). Joint Monitoring Programme for Water Supply and Sanitation; Meeting the MDG drinking water and sanitation target: a mid-term assessment of progress, 2004. [en línea]. WHO Library Cataloguing-in-Publication Data. Disponible en http://www.who.int/water_sanitation_health/monitoring/jmp2004/en/ Consultado el: 30-09-08.

WHO. (2006) Guidelines for drinking-water quality [en línea] : incorporating first addendum. Vol. 1, Recommendations. – 3rd ed. Electronic version for the Web.< www.who.int/water_sanitation_health/dwq/gdwq3rev/en> Consultado el: 30-10-08.

Wright H. B. y W. L. Cairns. (Sin fecha) Desinfección de agua por medio de luz ultravioleta. [en línea]. Trojan Technologies Inc. 3020 Gore Road, London, Ontario, Canada N5V 4T7. Disponible en <www.contraplagas.es/conductos.pdf> Consultado el: 30-09-2008.

ANEXO 1. Datos para calcular las cinéticas de inactivación

Coliformes totales, 940 W/m²

t (hr)	I (W/m ²)	F (W.h/m ²)	Transp. N ¹	T (°C)	½ Negra N ¹	T (°C)	Negra N ¹	T (°C)	Testigo N ¹
0.0	0	0	125900	24	125900	24	125900	24	125900
0.2	756	189	64880		54290		120300		114500
0.5	806	201.5	17260	30	19680	39	86640	37	77100
1.0	885	442.5	2755	36	449	52	23510	48	75900
1.5	951	475.5	650	41	0	64	1460	55	68300
2.0	988	494	7.4	46	0	71	0	63	88000
2.5	1005	502.5	7.4	49	0	73		71	60900
3.0	1006	503	0	50	0	72		74	71700
4.0	964	964	0	52	4	68		75	33200
	Rad, acumulada	3772							

t = tiempo; I = Intensidad de radiación; F = fluencia (I x T); Transp. = PET transparente; T = Temperatura; ½ Negra = PET pintado a la mitad de negro; Negra = PET pintado completamente de negro; Testigo = PET pintado de negro, mantenido en la obscuridad; ¹N = NMP/100 ml

Coliformes totales, 505 W/m²

t (hr)	I (W/m ²)	F (W.h/m ²)	Transp. N ¹	T (°C)	½ Negra N ¹	T (°C)	Negra N ¹	T (°C)	Testigo N ¹
0	0	0	816400	23	816400	23	816400	23	816400
0.5	532	266	241900	27	241920	32	1732800	32	1413600
1	646	323	241900	30	241900	37	241900	38	1299600
1.5	511	255.5	241920	32	241900	40	241920	39	1732800
2	453	226.5	24192	32	24192	42	24192	42	1413600
3	702	702	1841	38		52	4838	49	1413600
4	457	457	6	36		51	2419	48	241900
5	495	495		37		51	2419	49	1198500
6	325	325		31		40	2419	38	1413600
		3050							

t = tiempo; I = Intensidad de radiación; F = fluencia (I x T); Transp. = PET transparente; T = Temperatura; ½ Negra = PET pintado a la mitad de negro; Negra = PET pintado completamente de negro; Testigo = PET pintado de negro, mantenido en la obscuridad; ¹N = NMP/100 ml

Escherichia coli, 940 W/m²

t (hr)	I (W/m ²)	F (W.h/m ²)	Transp. N ¹	T (°C)	½ Negra N ¹	T (°C)	Negra N ¹	T (°C)	Testigo N ¹
0.0	0	0	39900	24	39900	24	39900	24	39900
0.2	756	189	17820		18420		26020		46400
0.5	806	201.5	8240	30	3050	39	30760	37	29200
1.0	885	442.5	20	36	0	52	9830	48	21600
1.5	951	475.5	0	41	0	64	630	55	34500
2.0	988	494	0	46	0	71	0	63	21600
2.5	1005	502.5	0	49	0	73		71	12100
3.0	1006	503	0	50	0	72		74	12900
4.0	964	964	0	52	0	68		75	9700
3772									

t = tiempo; I = Intensidad de radiación; F = fluencia (I x T); Transp. = PET transparente; T = Temperatura; ½ Negra = PET pintado a la mitad de negro; Negra = PET pintado completamente de negro; Testigo = PET pintado de negro, mantenido en la obscuridad; ¹N = NMP/100 ml

Escherichia coli, 505 W/m²

t (hr)	I (W/m ²)	F (W.h/m ²)	Transp. N ¹	T (°C)	½ Negra N ¹	T (°C)	Negra N ¹	T (°C)	Testigo N ¹
0	0	0	601000	23	601111	23	601000	23	601000
0.5	532	266	241900	27	241920	32	727000	32	579400
1	646	323	111900	30	241900	37	241900	38	579400
1.5	511	255.5	6460	32	241900	40	241920	39	579400
2	453	226.5	106	32	24192	42	24192	42	579400
3	702	702	0	38	0	52	4838	49	547500
4	457	457	1	36	0	51	2419	48	435200
5	495	495		37	0	51	1299	49	344800
6	325	325		31	0	40	2419	38	488400
3050									

t = tiempo; I = Intensidad de radiación; F = fluencia (I x T); Transp. = PET transparente; T = Temperatura; ½ Negra = PET pintado a la mitad de negro; Negra = PET pintado completamente de negro; Testigo = PET pintado de negro, mantenido en la obscuridad; ¹N = NMP/100 ml

Salmonella arizonae, 742 W/m²

t (hr)	I (W/m ²)	F (W.h/m ²)	Transp. N ¹	T (°C)	½ Negra N ¹	T (°C)	Negra N ¹	T (°C)	Testigo N ¹
0.00	0	0	27000	23	27000	23	27000	23	27000
0.25	762	190.5	1890	26	2700	29	1890	31	18900
0.50	823	205.75	1890	28	1890	33	2700	36	18900
0.75	866	216.5	2400	30	2400	37	2400	39	27000
1.00	918	229.5	438	32	2400	41	2400	43	18900
1.50	949	474.5	26	38	438	53	270	49	27000
2.00	993	496.5	95	42	45	61	57	50	18900
2.50	1035	517.5	270	46	438	67	95	51	18900
3.00	1005	502.5	438	47	438	66	58	51	68000
2833.25									

t = tiempo; I = Intensidad de radiación; F = fluencia (I x T); Transp. = PET transparente; T = Temperatura; ½ Negra = PET pintado a la mitad de negro; Negra = PET pintado completamente de negro; Testigo = PET pintado de negro, mantenido en la obscuridad; ¹N= NMP/100 ml

Salmonella typhi, 682 W/m²

t (hr)	I (W/m ²)	F (W.h/m ²)	Transp. N ¹	T (°C)	½ Negra N ¹	T (°C)	Negra N ¹	T (°C)	Testigo N ¹
0.0	0	0.0	43800	24	43800	24	240000	24	240000
0.3	769	230.7	4380	26	24000	28	24000	30	
0.6	778	233.4	2700	30	2700	33	24000	33	
0.8	783	156.6	73	31	2700	36	24000	36	18900
1.3	778	389.0	0	34	9	41	2400	40	7600
1.6	755	226.5	0	37	4	47	2400	45	
2.2	720	720.0	9	40	0	50	438	46	18900
3.2	653	653.0	4	38		51	0	48	18900
4.2	523	523.0	0	33		47	4	43	240000
3132.2									

t = tiempo; I = Intensidad de radiación; F = fluencia (I x T); Transp. = PET transparente; T = Temperatura; ½ Negra = PET pintado a la mitad de negro; Negra = PET pintado completamente de negro; Testigo = PET pintado de negro, mantenido en la obscuridad; ¹N= NMP/100 ml

Enterococcus faecalis, 880 W/m²

t (hr)	I (W/m ²)	F (W.h/m ²)	Transp. N ¹	T (°C)	½ Negra N ¹	T (°C)	Negra N ¹	T (°C)	Testigo N ¹
0.00	0	0	8000	25	8000	25	8000	25	8000
0.25	779	194.75	3090	29	3818	31	5000	30	
0.50	801	200.25	818	32	1818	35	3545	35	
0.75	843	210.75	545	36	636	42	3818	41	
1.00	878	219.5	0	40	600	48	3363	47	4000
1.50	898	449		46	26	58	1300	56	
2.00	909	454.5		52	0	66	87	62	3090
2.50	935	467.5		55		72	0	67	3636
4.00	886	1329		60		76		75	2636
3525.25									

t = tiempo; I = Intensidad de radiación; F = fluencia (I x T); Transp. = PET transparente; T = Temperatura; ½ Negra = PET pintado a la mitad de negro; Negra = PET pintado completamente de negro; Testigo = PET pintado de negro, mantenido en la obscuridad; ¹N= NMP/100 ml

Vibrio cholerae O1 Inaba, 747.68 W/m²

t (hr)	I (W/m ²)	F (W.h/m ²)	Transp. N ¹	T (°C)	½ Negra N ¹	T (°C)	Negra N ¹	T (°C)	Testigo N ¹
0.00	0	0	240000	22	7590	22	7590	22	7590
0.25	790	197.5	27000	25	4500	29	4500	29	
0.50	917	229.25	0	27	950	33	950	33	
0.75	953	238.25		30	0	38	950	39	
1.00	985	246.25		33	0	44	950	44	2800
1.50	943	471.5		39	0	54	0	53	
2.00	874	437		42	0	61	0	59	
3.00	786	786		45	0	64	0	62	2800
4.00	565	565		45	0	62	0	60	4500
3170.75									

t = tiempo; I = Intensidad de radiación; F = fluencia (I x T); Transp. = PET transparente; T = Temperatura; ½ Negra = PET pintado a la mitad de negro; Negra = PET pintado completamente de negro; Testigo = PET pintado de negro, mantenido en la obscuridad; ¹N= NMP/100 ml

Vibrio cholerae O1 Inaba, 553 W/m²

t (hr)	I (W/m ²)	F (W.h/m ²)	Transp. N ¹	T (°C)	½ Negra N ¹	T (°C)	Negra N ¹	T (°C)	Testigo N ¹
0.00	0	0	240000	19	240000	19	240000	19	240000
0.25	644	161	240000	22	240000	24	240000	24	
0.50	789	197.25	240000	24	240000	27	240000	27	
0.75	787	196.75	0	26	240000	30	240000	30	
1.00	765	191.25	0	27		33	24000	32	240000
1.50	552	276	0	29	2700	37	24000	36	
2.00	615	307.5	0	30	40	39	24000	38	240000
3.00	565	565	0	31	0	43	2400	40	240000
4.00	351	351	0	30	0	43	2400	40	240000
2245.75									

t = tiempo; I = Intensidad de radiación; F = fluencia (I x T); Transp. = PET transparente; T = Temperatura; ½ Negra = PET pintado a la mitad de negro; Negra = PET pintado completamente de negro; Testigo = PET pintado de negro, mantenido en la obscuridad; ¹N= NMP/100 ml