

ALGUNAS EXPERIENCIAS COLOMBIANAS EN PURIFICACION SOLAR DE AGUAS

RAFAEL G. BELTRAN, HAROLD HERNANDEZ,
GUILLERMO MAYA, FERNANDO SALAMANCA
Departamento de Ingeniería Mecánica - Universidad de Los Andes
Bogotá - Colombia

RESUMEN

En este documento se presentan algunos resultados de estudios realizados en cuanto a la calidad de aguas tratadas por medio de energía solar. Se consideran sistemas de destilación simple y por etapas múltiples, tratamiento mediante luz ultravioleta, y pasteurizadores o "hervidores" solares. La mayoría de los resultados se refiere a ensayos de calidad bacteriológica del agua tratada. Se muestra como los sistemas de destilación producen aguas prácticamente puras, y libres de minerales, lo cual los hace muy versátiles para el tratamiento de casi todo tipo de aguas. El hervidor solar utilizado en las pruebas mostró una buena calidad del agua que produce, desde el punto de vista bacteriológico. Sin embargo, el equipo es sensible a la turbiedad del agua utilizada, ya que los lodos tienden a depositarse en el colector que es la parte más baja del sistema. Los sistemas de desinfección mediante luz ultravioleta son los menos eficientes existiendo una dosis mínima de radiación que elimina la bacteria *Escherichia Coli*. Sin embargo no existiendo un efecto residual, la contaminación aumenta en las aguas tratadas que se almacenan por periodos de 24 horas.

1. INTRODUCCION

Obtener agua pura ha sido uno de los grandes problemas de la humanidad a lo largo de la historia. Problema que abarca desde la búsqueda de fuentes de agua potable hasta la invención de sistemas que la garanticen. En la actualidad, debido a los grandes índices de contaminación de las aguas utilizadas por una porción importante de la población de países del Tercer Mundo como es el caso de Colombia en donde solo un 30% de la población cuenta con servicios de acueducto -- y aún en esos casos debe recurrir a hervir el agua por su pobre calidad desde el punto de vista bacteriológico -- se hace necesario explorar métodos económicos y efectivos para purificar el agua y hacerla aceptable para el consumo humano. Al nivel de la población rural la situación del agua para consumo es crítica ya que se debe recurrir a aguas por lo general duras o salobres, cuando existe una fuente cercana, o a aguas lluvias recogidas de manera rudimentaria sobre los techos y las cuales presentan altísima contaminación bacterial.

Adicionalmente, en algunos procesos de las industrias química y farmacéutica, por ejemplo, se necesita agua de alta calidad y en estos casos se hace necesario encontrar sistemas de filtración, destilación, electrodiálisis, desionización, etc. Cada uno de estos procesos suministra agua con diferentes niveles de calidad y con consumos específicos de energía variables. Su aplicación individual o combinada depende de la calidad deseada y las disponibilidades energéticas.

Las fuentes de agua se pueden clasificar básicamente en superficiales y subterráneas. Las fuentes de agua superficiales son el resultado del drenaje de las lluvias. Estas presentan grandes cantidades de material orgánico y biológico, mientras que las fuentes de agua

subterránea, que son el resultado del escurrimiento de las aguas hasta al subsuelo, son ricas en toda suerte de minerales, y en algunas oportunidades presentan también contaminación de tipo bacterial.

Aunque la calidad del agua depende de la fuente, generalmente se puede encontrar en ella los siguientes tipos de contaminantes: partículas sólidas en suspensión, óxidos, contaminación orgánica, desinfectantes, microorganismos, sales, etc. Al analizar la calidad del agua y decidir sobre el proceso de purificación es necesario tener en cuenta algunos parámetros de calidad. Dentro de los parámetros de calidad se incluyen factores físico-químicos y biológicos tales como:

Parámetros Físicos-Químicos

- Sabor, color, olor
- Turbiedad (materiales insolubles suspendidos)
- Coloides
- Conductividad eléctrica (cantidad de material ionizable)
- pH (acidéz o alcalinidad)
- Contenido de hierro y Manganeseo
- Otros minerales
- Fosfatos
- Detergentes

Parámetros Biológicos:

- D.B.O. (Demanda biológica de oxígeno)
- D.Q.O. (Demanda química de oxígeno)
- Coliformes totales y fecales (grado de contaminación fecal)

Dependiendo del tipo y grado de contaminación se hace necesario adecuar procesos de pre y post tratamiento del agua además de pasarla por el sistema de purificación.

Las normas de calidad física y química del agua potable son reglamentadas a nivel gubernamental por cada país. En el caso de Colombia son aplicables los siguientes criterios de calidad, de acuerdo al decreto 2105 de 1983, del Ministerio de Salud Pública, ref [9]

TABLA 1. NORMAS DE CALIDAD FISICA

CARACTERISTICA FISICA	UNIDAD DE MEDIDA	VALOR ADMISIBLE	VALOR DESEABLE
Color	Unidades de platino-cobalto (UPC)	15	5
Olor y sabor	---	Inobjetable	Inobjetable
Turbiedad	Unidades Nefelométricas	5	1
Sólidos totales	(mg/litro)	500	200

TABLA 2. CRITERIOS DE CALIDAD QUIMICA

CARACTERISTICA QUIMICA	UNIDAD DE MEDIDA	VALOR ADMISIBLE
Cloruros	Cl ⁻	250
Dureza total	CaCO ₃	30-150
Hierro Total	Fe	0.3
Magnesio	Mg ó CaCO ₃	36
Sulfatos	SO ₄ ⁻	250
Zinc	Zn	10

TABLA 3. CONTENIDO DE FLUOR, EXPRESADO COMO ION FLUORURO F⁻, COMO FUNCION DE LA TEMPERATURA

TEMPERATURA AMBIENTAL MEDIA, °C	VALOR ADMISIBLE (mg/litro)	VALOR DESEABLE (mg/litro)
10.0 - 12.0	1.7	1.2
12.1 - 14.5	1.5	1.1
14.6 - 17.5	1.3	1.0
17.6 - 21.0	1.2	0.9
21.1 - 26.0	1.0	0.8
26.1 - 32.0	0.8	0.7

TABLA 4. NORMAS PARA ALGUNOS ELEMENTOS Y SUSTANCIA QUIMICAS

SUSTANCIA	MEDIDA	VALOR (mg/lit)	SUSTANCIA	MEDIDA	VALOR (mg/lit)
Aluminio	Al	0.2	Arsénico	As	0.05
Bario	Ba	1.0	Cadmio	Cd	0.005
Cianuros	CN	0.1	Cobre	Cu	1.0
Cromo	Cr+6	0.05	Fenoles	Fenol	0.001
Mercurio	Hg	0.001	Nitritos	NO-2	0.1
Nitratos	NO-3	45.0	Plata	Ag	0.05
Plomo	Pb	0.05	Selenio	Se	0.01
Activas al azul de metileno	ABS,ALS	0.5	Grasas y Aceites		no detectable

Las normas de calidad bacteriológica se refieren al contenido de un determinado número de colonias en un cultivo estándar, particularmente de coliformes totales y fecales. En Colombia rigen actualmente los siguientes criterios de calidad de aguas potables:

Se debe realizar un muestreo mensual de las aguas para acueductos. El número de colonias producidas por las bacterias coliformes en una muestra no deberá exceder 3 por 50 ml, 6-4 por 100 ml, 6-7 por 200 ml, en (a) dos muestras consecutivas (b) más de una muestra cuando se examinen menos de 20 muestras mensuales (c) más del 15% de las muestras cuando se examinen 20 o más mensuales. Independientemente del tipo de análisis utilizado, ninguna muestra de agua potable debe contener E. Coli en 100 ml de agua.

Tabla 1. Normas de calidad de agua potable.

Parámetro	Unidad	Valor
Coliformes totales	por 100 ml	6-4
Coliformes fecales	por 100 ml	0-1
E. Coli	por 100 ml	0

2. PROCESOS DE PURIFICACION RELACIONADOS CON EL USO DE LA ENERGIA SOLAR

Existen diversas posibilidades o caminos para obtener agua "pura" a partir del uso de la energía solar. Estos incluyen los procesos de destilación, congelación, tratamiento mediante luz ultravioleta, y pasteurización o hervido del agua.

PROCESOS DE TRATAMIENTO SOLAR DE AGUA

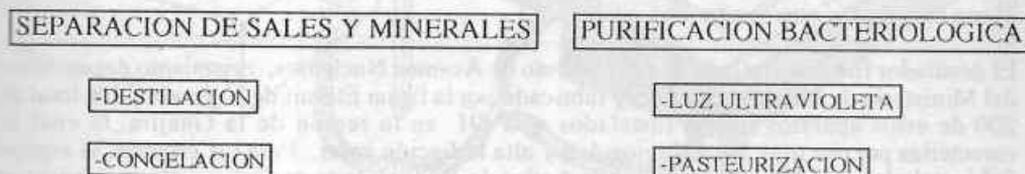


Figura 1.

De las diversas vías o formas de tratamiento, la destilación es hasta ahora la más utilizada, habiéndose realizado instalaciones de bancos de destiladores en varias partes del mundo con éxito relativo. Un estudio de sus límites de rendimiento ha sido realizado por varios autores, ref [4], [5]. Los equipos de destilación son simples aunque su operación, como en otros sistemas similares tiende a presentar problemas principalmente de mantenimiento y de limpieza de las instalaciones. Sin embargo, es el único método que puede remover minerales a la vez que está en capacidad de eliminar contaminación de tipo bacterial.

El uso de la radiación ultravioleta es conocido desde hace muchos años. En efecto, se pueden conseguir equipos que utilizan lámparas de luz ultravioleta y que están en capacidad de purificar, desde el punto de vista bacterial, el agua para el consumo. El uso de la luz solar para desinfección ha sido propuesto hace algún tiempo, a raíz de trabajos realizados en Israel con agua colocada en recipientes de vidrio. Un estudio extenso de este tipo de sistemas ha sido realizado con el auspicio de las Naciones Unidas, y se ha propuesto que muchas de las aguas contaminadas podrían ser tratadas para eliminar la bacteria *E. Coli*.

La pasteurización consiste en elevar la temperatura del agua hasta cerca del punto de ebullición, con el fin de matar los gérmenes patógenos. Este procedimiento es realizado por muchas familias del tercer mundo en lugares en donde no hay acueductos o cuando la calidad del agua municipal no es suficiente. En el caso Colombiano el Ministerio de Salud recomienda que se hierva el agua a fuego vivo por lo menos durante diez minutos. Los pasteurizadores o "hervidores" solares son una alternativa energéticamente viable que pueden tratar cantidades relativamente pequeñas de agua para el consumo humano.

El tratamiento de agua por congelación ha sido estudiado menos que los métodos anteriores, aunque se están realizando estudios para mejorar su rendimiento, principalmente para la eliminación de sales y minerales disueltos. Hay mucho trabajo por realizar en cuanto a los métodos de eliminación de la salmuera, así como estudiar su rendimiento desde el punto de vista energético.

3. EXPERIENCIAS EN DESTILACION SOLAR DE AGUA

En esta parte se muestran algunos resultados del análisis de aguas contaminadas tratadas mediante destilación.

3.1 ENSAYOS CON UN DESTILADOR SOLAR SIMPLE

El equipo consta de una bandeja de asbesto-cemento de 5 milímetros de espesor dividida en dos compartimientos en los cuales se deposita el agua salada. La cubierta es de vidrio corriente de cuatro milímetros de espesor. Para el suministro de agua al destilador existe un depósito externo colocado a una altura tal que su nivel es igual al del agua en las bandejas. Tiene área de 1 metro cuadrado. (ver Fig. 2)

El destilador fué desarrollado por el Instituto de Asuntos Nucleares, organismo dependiente del Ministerio de Minas y Energía, y fabricado por la firma Eternit de Colombia. Un total de 200 de estos aparatos fueron instalados en 1991 en la región de la Guajira, la cual se caracteriza por una muy baja pluviosidad y alta radiación solar. Para las pruebas, el equipo fué instalado en la Universidad de Los Andes de Bogotá, y se realizaron algunos ensayos tanto de producción de agua potable destilada, como de la calidad de dicha agua para el consumo humano.

Para realizar las pruebas se utilizaron aguas contaminadas: Se tomó una muestra en las cercanías en una fuente de agua superficial, con contenidos variables de bacterias. La otra muestra fué traída desde una fuente rural igualmente contaminada principalmente por feces de ganado vacuno.

Durante los ensayos se llevó registro de la radiación instantánea, la cual se integró para obtener la radiación acumulada durante un período de tiempo. Así mismo se recogió el agua destilada con el fin de medir la cantidad producida, así como para someterla al análisis bacteriológico el cual dió el número de colonias de bacilo Coli total, y de bacilo Coli fecal.

La Tabla 5. muestra algunos resultados obtenidos, en la cual se consigna el conteo de E. Coli (fecal) en el agua destilada. Se observa que en comparación con la contaminación inicial, hay una notable reducción en el contenido bacterial en el destilado. Así mismo se observa que la exposición al sol reduce los contenidos finales de bacterias, lo cual se logra después de varias horas de operación del destilador.

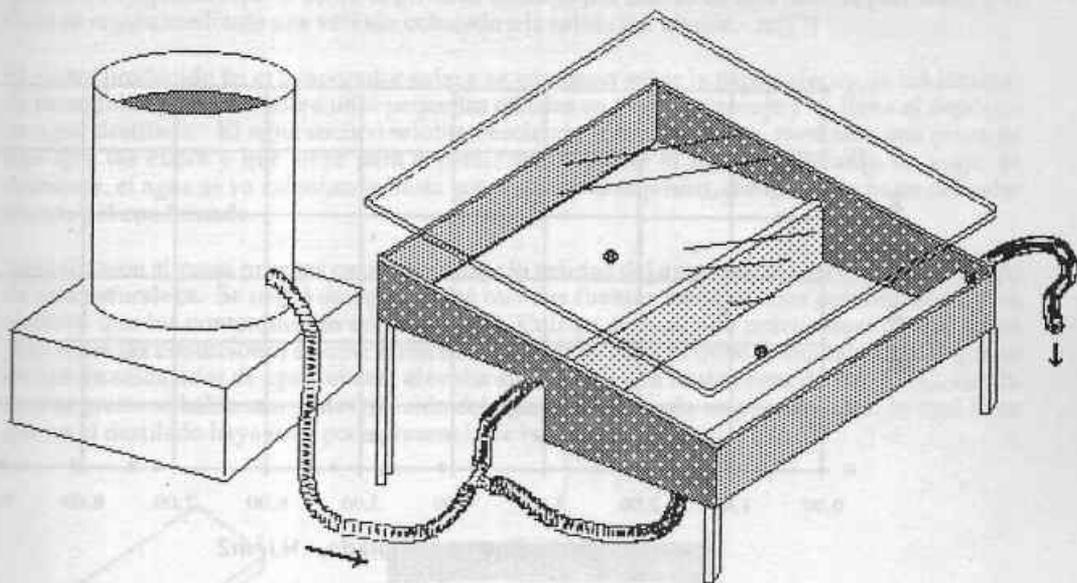


Figura 2. Destilador solar simple usado en las pruebas

TABLA 5. RESULTADOS BACTERIOLÓGICOS TÍPICOS OBTENIDOS CON UN DESTILADOR SOLAR SIMPLE, ref[7]

Día	Hora	Radiación	Radiación	No. de Colonias/100 ml	
		Instantánea W/m ²	Total MJ/m ²	En El Agua	Destilado
11	8:30	91	0	305	12
	9:00	121	0,19	305	9
	9:30	213	0,49	305	10
	10:00	225	0,89	305	12
	10:30	273	1,33	305	11
	11:00	334	1,88	305	6
	11:30	522	2,65	305	4
	12:00	589	3,65	305	6
	12:30	735	4,84	305	1
	13:00	668	6,11	305	2
	13:30	553	7,20	305	0
	14:00	437	8,09	305	1
	14:30	7,5	8,90	305	0

La Figura 3 . muestra los resultados de varios días de operación en los cuales se realizó el muestreo del destilado. Se presenta el número de colonias observado contra la radiación total acumulada, MJ/m².

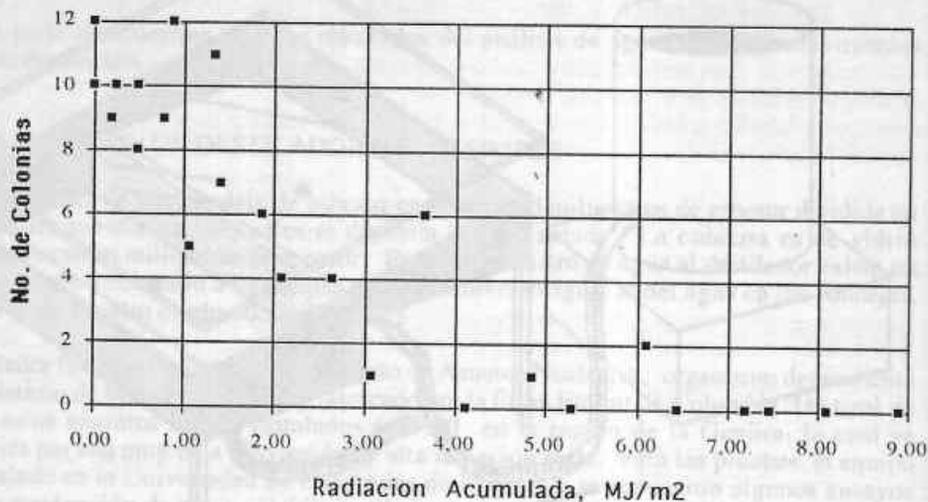


Figura 3. Resultados De Ensayos de Calidad del Agua En Un Destilador Solar Simple

En esta gráfica se observa que no hay una completa eliminación de *E. Coli* en el agua destilada. Esto se debe posiblemente a alguna contaminación que puede ocurrir sobre la cubierta de vidrio del destilador, la cual está a baja temperatura, así como a problemas en la recolección de las muestras. Cabe anotar que para conteos bajos de colonias es difícil obtener inferencias a partir de los métodos de laboratorio utilizados. Como resultado, se puede decir que la destilación solar, aunque no es un método que tenga altos rendimientos para la producción de agua potable, entrega un producto de alta calidad para el consumo humano, aún en el caso en que el agua de la fuente contenga altos índices de contaminación. Adicionalmente, el destilado está prácticamente libre de todo contenido de sales, como ha sido demostrado en varios estudios anteriores, con lo cual este método de purificación es apto para la producción de pequeñas cantidades de agua potable a partir de aguas muy contaminadas tanto desde el punto de vista bacterial como del punto de vista de contenido de minerales.

3.2 ENSAYOS CON UN DESTILADOR DE ETAPAS MULTIPLES

Adicionalmente, se ha realizado una serie de pruebas de calidad de aguas, destiladas en un equipo experimental de etapas múltiples. La figura 4 muestra el esquema del equipo construido. Este consta de cuatro módulos o bandejas de condensación de acero inoxidable sobre las cuales se pretendía realizar la destilación en forma regenerativa con el fin de aumentar el rendimiento energético del proceso. Así mismo el equipo cuenta con un evaporador calentado con energía eléctrica y el cual está situado en la parte inferior del destilador. La resistencia eléctrica tiene capacidad de disipar 650 watts, aunque su capacidad es regulada por medio de un dimmer. Cada una de las láminas tiene dimensiones de 250 x 500 milímetros. En la parte superior se colocó un tanque de agua salobre con capacidad de 5

galones. El agua se reparte sobre la primera bandeja por medio de una tubería perforada y el flujo se regula mediante una válvula colocada a la salida del tanque. ref[7]

El vapor producido en el evaporador sube y se condensa sobre la parte inferior de las láminas de inoxidable y escurre sobre unas pequeñas canales en donde se recoge y se lleva al depósito de agua destilada. El agua sucia o salobre desciende sobre las placas, mediante una pieza de lino que las cubre y que sirve para esparcir uniformemente el agua. Durante su viaje de descenso, el agua se va calentando hasta gotear sobre el depósito, recuperando parte del calor latente del condensado.

Se realizaron algunas pruebas para determinar la calidad del agua que se obtenía de un equipo de esta naturaleza. Se partió de agua de las mismas fuentes mencionadas anteriormente y se observó que los contenidos de colonias de E. Coli en el destilado prácticamente eran nulos para todas las condiciones de operación del destilador. Esto se debe principalmente a que se utilizó un calentador de agua, el cual elevaba su temperatura hasta cerca de los 80 °C, con lo cual se presume había una pasteurización del agua contaminada en primer lugar, lo cual hace que en el destilado haya muy poca presencia de bacterias.

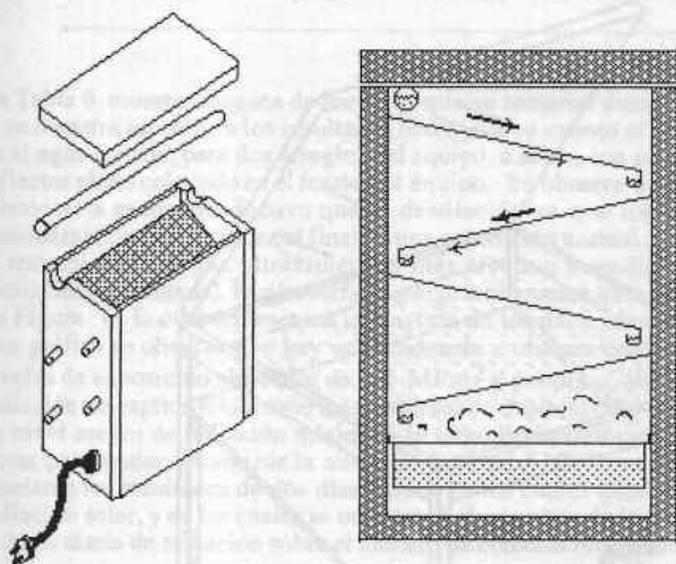


Figura 4. Destilador de Etapas Múltiples

4. TRATAMIENTO DE AGUAS MEDIANTE LUZ ULTRAVIOLETA

Como se indicó en el numeral 2. se han realizado experiencias en varias partes del mundo con el método de desinfección solar, mediante la exposición de esta en recipientes de vidrio. Para este fin la Organización Mundial de la Salud recomienda que las capas de agua sean delgadas con el fin de que haya una muy buena exposición al espectro ultravioleta de la radiación. Haciendo uso de un equipo con paredes transparentes se realizó un estudio para determinar el poder bacteriológico de un sistema para exponer aguas contaminadas desde el punto de vista bacteriológico a radiación ultravioleta, ref [6].

El equipo contruido se muestra en la Figura 5, el cual consiste de una bandeja cuyas paredes son transparentes a la radiación solar. Estas son contruidas de vidrio corriente de 3 milímetros. La estructura de la base y los lados del tanque se realizó en perfiles angulares de aluminio de 3/8"x 3/8" x 1/8". Las dimensiones de este sistema son 500 mm de largo x 500 milímetros de ancho x 150 milímetros de altura. El fondo del depósito es inclinado con el fin de permitir el drenaje del agua tratada. Este equipo permite exponer a la luz del sol 18 litros de agua por día. Uno de los prototipos contruidos tenía el fondo reflectivo con el fin de aprovechar mejor la radiación incidente.

Las pruebas se realizaron mediante el uso de aguas contaminadas de varias fuentes, a las cuales se les realizó un análisis antes del tratamiento, y durante del tratamiento, para diferentes cantidades de exposición a la radiación solar. Las muestras fueron tomadas principalmente de una fuente conocida como el Chorro de Padilla localizado sobre las faldas del cerro Monserrate en Bogotá, la cual tenía condiciones físico-químicas aceptables, pero con contaminación bacterial. Al igual que en otros experimentos de esta naturaleza, se registró el nivel de radiación, y se tomaron muestras en el tiempo con el fin de determinar el contenido de E. Coli en el agua.

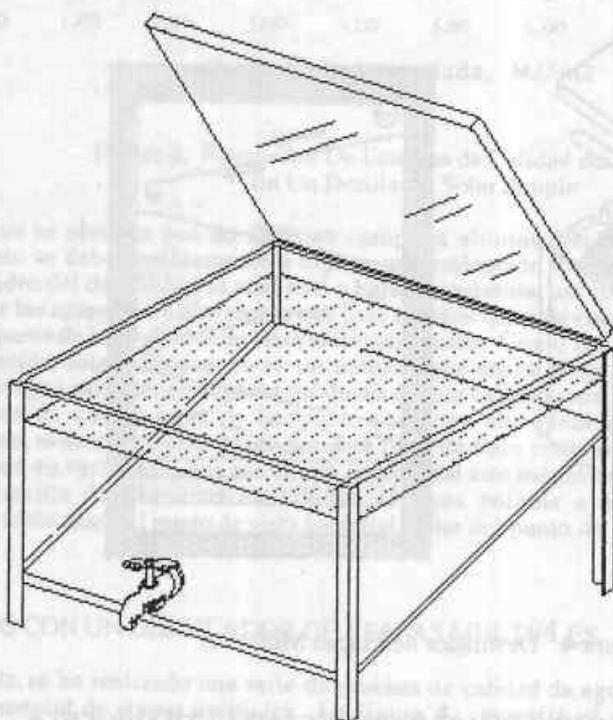


Figura 5. Equipo para Tratamiento de Agua con Luz Solar

TABLA 6. RESULTADOS BACTERIOLOGICOS TIPICOS OBTENIDOS CON UN LUZ ULTRAVIOLETA, ref[6]

Día/ Mes	Hora	Radiación	Radiación	No. de Colonias/100 ml	
		Instantánea W/m ²	Total MJ/m ²	Transparente	Reflectivo
13/II	9:30	91	0	51	51
	10:30	121	1,41	28	44
	11:30	213	2,23	29	26
	12:30	225	3,85	26	7
	13:30	273	5,56	5	3
12/II	10:00	213	0	51	51
	11:00	166	0,68	28	44
	12:00	221	1,38	29	26
	13:00	257	2,24	26	7
	14:00	172	3,01	5	3

La Tabla 6 muestra algunos de los datos que se tomaron durante los ensayos. En la Figura 6 se muestra así mismo los resultados obtenidos en cuanto al contenido de bacilo Coli fecal en el agua tratada, para dos arreglos del equipo, a saber, con paredes transparentes, y con un reflector plano colocado en el fondo del equipo. Se observa que el tratamiento mediante luz ultravioleta es menos efectivo que la destilación ya que los contenidos de bacterias son considerablemente mayores al final de una exposición normal de un día típico. Sin embargo, el tratamiento con luz ultravioleta es más efectivo a medida que aumenta la exposición (radiación acumulada), hasta obtener agua prácticamente libre de E. Coli. Esto se muestra en las Figura 6 la cual representan la mayoría de los datos obtenidos en esta experiencia. En esta gráfica se observa que hay una tendencia a obtener contaminación bacteriana cero para niveles de exposición alrededor de 8.5 MJ/m² y por día. Cabe anotar que la simple dosis de radiación no explica totalmente los resultados de desinfección obtenidos sino que se requiere un nivel medio de radiación mínimo a lo largo de un tiempo de exposición del orden de 4 horas para poder garantizar la ausencia total de E. Coli en el agua. Las figuras 7 y 8 muestran los resultados de dos días típicos en los cuales hubo condiciones muy distintas de radiación solar, y en las cuales se muestra el efecto tanto de la contaminación inicial como de la dosis diaria de radiación sobre el número de colonias remanentes.

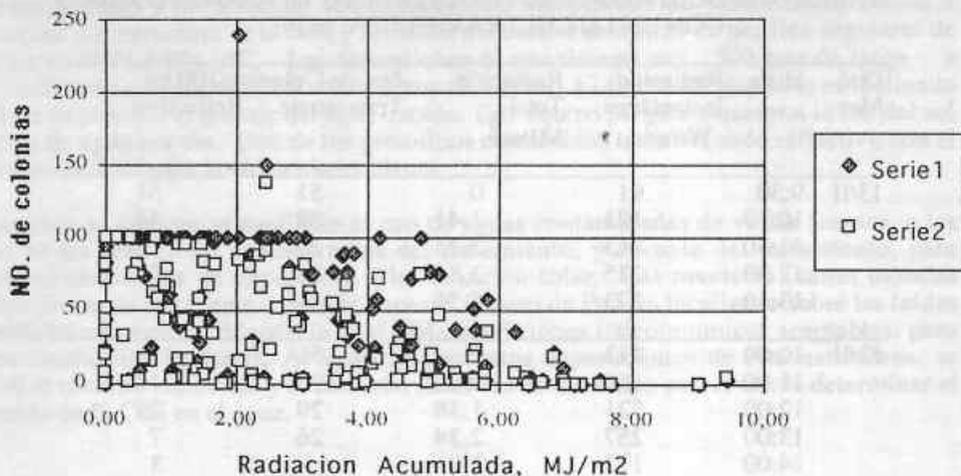


Figura 6. Efecto de la Radiación Solar Sobre la Contaminación Bacterial - Tratamiento por Luz Ultravioleta
 Serie 1- Equipo con fondo transparente
 Serie 2- Equipo con fondo reflectivo

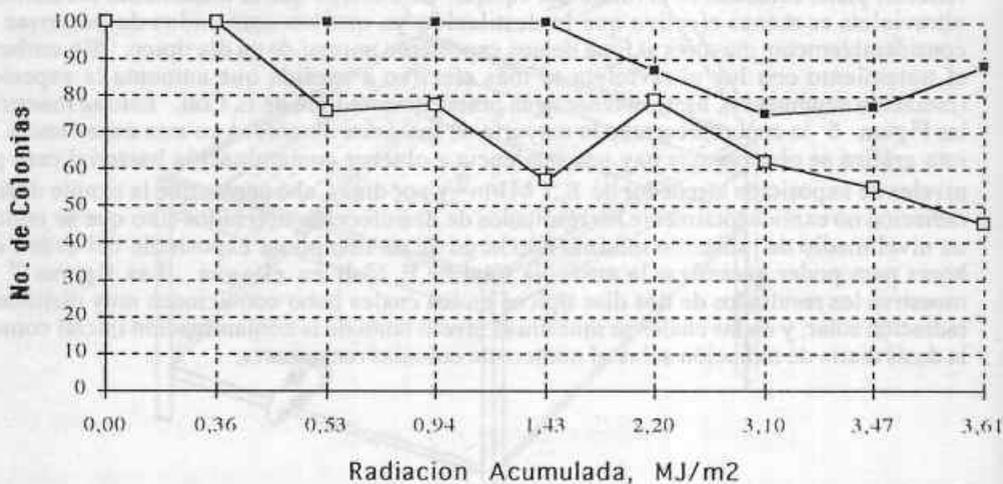


Figura 7. Resultados del tratamiento con luz ultravioleta en un día oscuro

En el mismo trabajo se adelantó un análisis del contenido bacterial, después de varias horas de haber cesado la exposición al sol, condición normal que se da cuando se almacena el agua para su posterior utilización. El agua se almacenó a 17°C en todos los casos. La Tabla 7 muestra los resultados obtenidos de algunas de las experiencias.

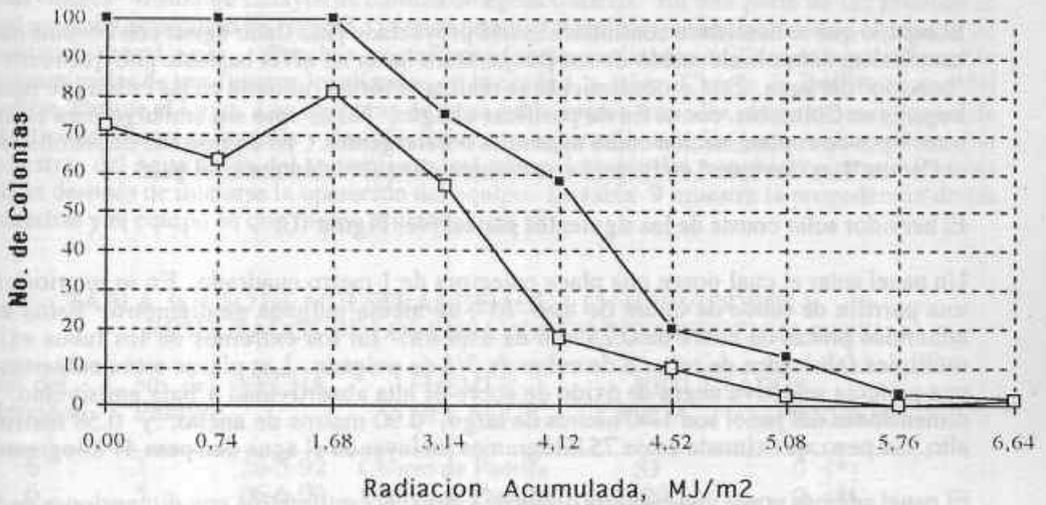


Figura 8. Resultados del tratamiento con luz ultravioleta en un día claro

TABLA 8. ANALISIS DE AGUAS ALMACENADAS A 17°C POR 24 HORAS LUEGO DE LA DESINFECCION CON LUZ ULTRAVIOLETA, ref [6]

Mes	Día	No. Inicial de colonias en 100 mililitros	No. de Colonias luego de 24 horas de almacenamiento
marzo	14	8	53
Abril	25	3	37
Abril	29	2	4
Mayo	8	3	7
Junio	20	3	17
Junio	25	3	17
Junio	28	1	9

La tabla anterior demuestra cómo hay un crecimiento de la población de bacterias después del tratamiento, lo cual indica que el agua tratada de esta manera debe ser consumida casi inmediatamente.

5. ENSAYOS EN EQUIPOS DE PASTEURIZACION DE AGUA

El equipo que se describe a continuación está proyectado para tratar aguas con contaminación bacterial mediante la elevación de sus temperatura hasta un nivel bastante alto que realice un "hervido" del agua. Este procedimiento se realiza se forma rutinaria en las estufas de muchos hogares en Colombia, con el fin de purificar el agua. No es apto sin embargo para eliminar otros tipos de contaminación como minerales o detergentes. El equipo fué desarrollado por el Centro "Las Gaviotas" en Bogotá y se comercializa actualmente en el país.

El hervidor solar consta de las siguientes partes: (ver Figura 10)

Un panel solar el cual posee una placa colectora de 1 metro cuadrado. En su interior existe una parrilla de tubos de cobre de tipo "M", de media pulgada de diámetro. Estos están adheridos placas de cobre de 0.25 mm de espesor. En los extremos de los tubos existen múltiples fabricados de tubería de cobre de 3/4 de pulgada. Las placas están cubiertas con una película selectiva negra de óxido de cobre de alta absortividad y baja emisividad. Las dimensiones del panel son 1.40 metros de largo, 0.90 metros de ancho, y 0.58 metros de alto. Su peso aproximado es de 75 kilogramos incluyendo el agua que pesa 41 kilogramos.

El panel además posee una cubierta doble de vidrio de 2 milímetros con dimensiones de 0.80 metros de ancho, por 0.86 metros de largo. Estos se fijan a los bordes del colector por medio de silicona sellante con resistencia hasta de 200 °C

Tanque de Paso. Es un tanque cónico fabricado en lámina de cobre de 0.25 milímetros de espesor. Está aislado con una capa de fibra de vidrio y poliuretano de 0.25 metros de largo. El diámetro de su base es 0.165 metros y el de su parte superior es 0.11 metros. En su interior existe un intercambiador de doble tubo de cobre, realizado en tubería de 1/2 y de 1/4 de pulgada. Se encuentra revestido con lámina galvanizada.

Tanque de almacenamiento de agua cruda. Este es un tanque cilíndrico para el almacenamiento del agua cruda realizado en acero inoxidable 304. El tanque consta de un flotador de cobre tipo lenteja, para controlar el nivel del agua en el mismo.

Tanque de almacenamiento de agua hervida. Es un tanque cilíndrico utilizado para recoger el agua tratada. Está fabricado en acero inoxidable 304. Tiene diámetro de 0.22 metros y longitud de 0.64 metros, con capacidad para 24 litros de agua.

Otras partes del equipo son su estructura de soporte la cual permite que el panel solar quede inclinado unos 15 grados con respecto al plano horizontal. Existe la posibilidad de utilizar un filtro para eliminación de la turbiedad en los casos en que sea necesario. Este va colocado en un recipiente de P.V.C.

En operación, el agua cruda pasa del tanque de recibo a la placa colectora por gravedad, cuando el nivel de radiación solar haya superado un valor mínimo para que el agua del colector se mueva por el efecto de termosifón. La inclinación y disposición de los elementos del aparato fijan en cierta forma la temperatura que debe alcanzarse para que haya flujo. El agua pasa luego al tanque de paso cónico en donde se presenta un flujo de dos fases: líquido y vapor. La fracción líquida sale por una tubería inferior del tanque de paso. Dicha tubería está dispuesta, como ya se indicó en forma de serpentín. Por la tubería interna de este intercambiador pasa el agua fría que viene del tanque de agua cruda. La fracción del agua que se encuentra en forma de vapor sale por una tubería superior del tanque de paso y escapa por un respiradero. Finalmente, el agua que ya ha sufrido un considerable aumento de temperatura pasa al tanque de almacenamiento de agua "hervida" para ser utilizada.

En las pruebas realizadas de este tipo de equipos se efectuó el seguimiento de algunos "hervidores" mediante ensayos de calidad de aguas tratadas. En una parte de las pruebas se usó agua del acueducto de Bogotá. Dichas pruebas simplemente indicaron que el equipo no contaminaba el agua. Pruebas posteriores fueron realizadas utilizando aguas bastante contaminadas de tres fuentes localizadas en la ciudad, a saber Chorro de Padilla, Lago del Salitre, Parque el Lago. Las muestras de agua sucia fueron tomadas mediante recipientes de plástico previamente lavados y desinfectados con agua caliente. En los ensayos se tomaron muestras del agua antes del tratamiento, así como después del tratamiento para diferentes horas después de iniciarse la operación del equipo. La tabla 9 muestra la procedencia de las muestras y el equipo en que fueron utilizadas, ref [8]

TABLA 9. USO DE MUESTRAS DE AGUA EN HERVIDORES Y RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE DESINFECCION, Ref[8]

No. del Hervidor	No. del Ensayo	FECHA	FUENTE DEL AGUA	RESULTADOS	
				CRUDA	HERVIDA
6	3	26-5-92	Chorro de Padilla	53	0 (*)
6	5	06-6-92	Chorro de Padilla	>200	0 (*)
6	7	08-6-92	Chorro de Padilla	>200	0
1	11	10-6-92	Lago del Salitre	79	0
2	12	10-7-92	Parque El Lago	>200	0
1	15	15-6-92	Lago del Salitre	162	0
2	16	16-6-92	Parque El Lago	>200	0
1	17	30-6-92	Lago del Salitre	>200	0
2	18	30-6-92	Parque El Lago	156	0

(*) Coli Fecal. En los demás casos se registra solamente el contenido de coliformes totales

Uno de los parámetros que se evaluó en este tipo de ensayos fué la productividad del equipo, como función de la radiación solar. Para esto se llevó un registro de la radiación instantánea por medio de un piranómetro Eppley de precisión, así como de la cantidad de agua que pasaba al tanque de almacenamiento de agua tratada. Gráficas típicas de estos ensayos se muestran en las figuras 11 y 12. Los días de las pruebas mostraron condiciones atmosféricas variables, con lo cual se pudo observar el funcionamiento de equipo para muchos regímenes. De las pruebas realizadas se puede concluir que (a) existe un nivel mínimo de intensidad de radiación que debe mantenerse durante un período antes de que el aparato comience a funcionar. Este nivel es del orden de 1000 W/m^2 . Estas condiciones se dieron durante la época de los ensayos cerca de las 11 a.m. Para que haya flujo se observó que la temperatura del tubo debía llegar a niveles entre los 80 y los 87 grados Celsius. Para que el equipo opere continuamente debe haber un nivel medio de radiación cercano a los 800 W/m^2 . Para estas condiciones el hervidor entrega agua en forma continua a la tasa aproximada de 2.0 mililitros por segundo, lo cual equivale a "hervir" 1800 mililitros en quince minutos. La tasa máxima observada fué del orden de 2,3 mililitros por segundo. La figura 9 muestra la producción diaria de agua potable en este equipo durante un período de varios días.

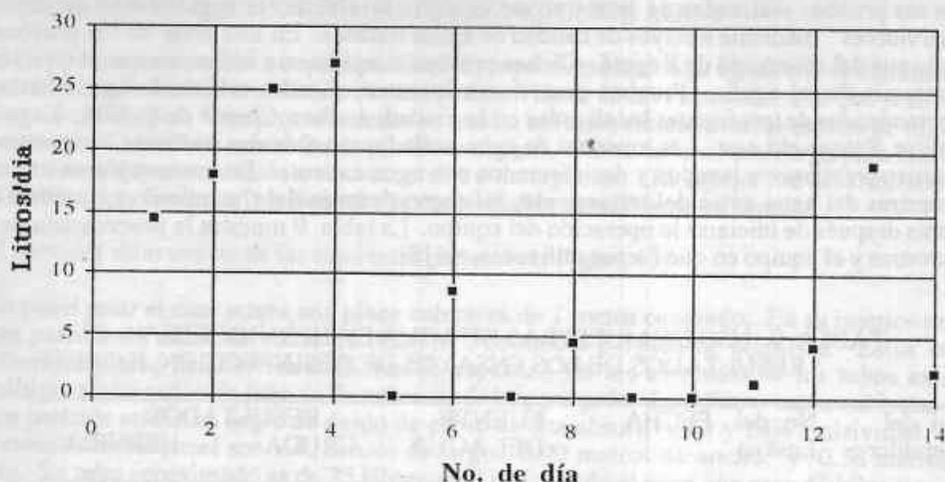


Figura 9. Producción de agua potable en el "hervidor" solar para condiciones típicas de funcionamiento en la ciudad de Bogotá

CONCLUSIONES

De los métodos de purificación o potabilización utilizados se observa que el más efectivo es la destilación, seguido del método de pasteurización. El tratamiento ultravioleta permite reducir notablemente el contenido de bacterias en el agua, pero su efectividad es menor y se observa el problema de que no es posible almacenar al agua por períodos de tiempo largos, lo cual limita su utilidad.

En los ensayos, realizados en épocas diferentes, se tuvo gran cuidado en la recolección y conservación refrigerada de las muestras de agua, cuando esto fué necesario, dado que estos procedimientos afectan notablemente los resultados del análisis.

Se utilizaron dos tipos distintos de análisis de las muestras de agua: el ensayo de tubos fué realizado en algunas de las series de datos. Por ejemplo en el caso del hervidor solar estos fueron realizados por el Instituto Nacional de Salud, en donde solo se usa éste método de análisis. Así mismo los ensayos del destilador solar fueron realizados por el Departamento de Microbiología de la Universidad de los Andes, en donde también se usa este ensayo. En este tipo de pruebas la muestra de agua se cultiva en varios tubos (5) de ensayo bajo condiciones controladas y su contenido bacterial se deduce de la producción de bióxido de carbono en un período de 24 horas. El resultado es el llamado número más probable de colonias.

El otro tipo de prueba utilizado es el de microfiltración de una muestra de 100 mililitros de agua. El filtrado se cultiva en un medio nutritivo y el desarrollo de colonias se puede observar en una retícula después del período de incubación.

Dada la naturaleza de los ensayos, existe una cierta dispersión de los datos, particularmente para bajos contenidos de carga bacterial. Por esta razón, valores por debajo de las 5 colonias

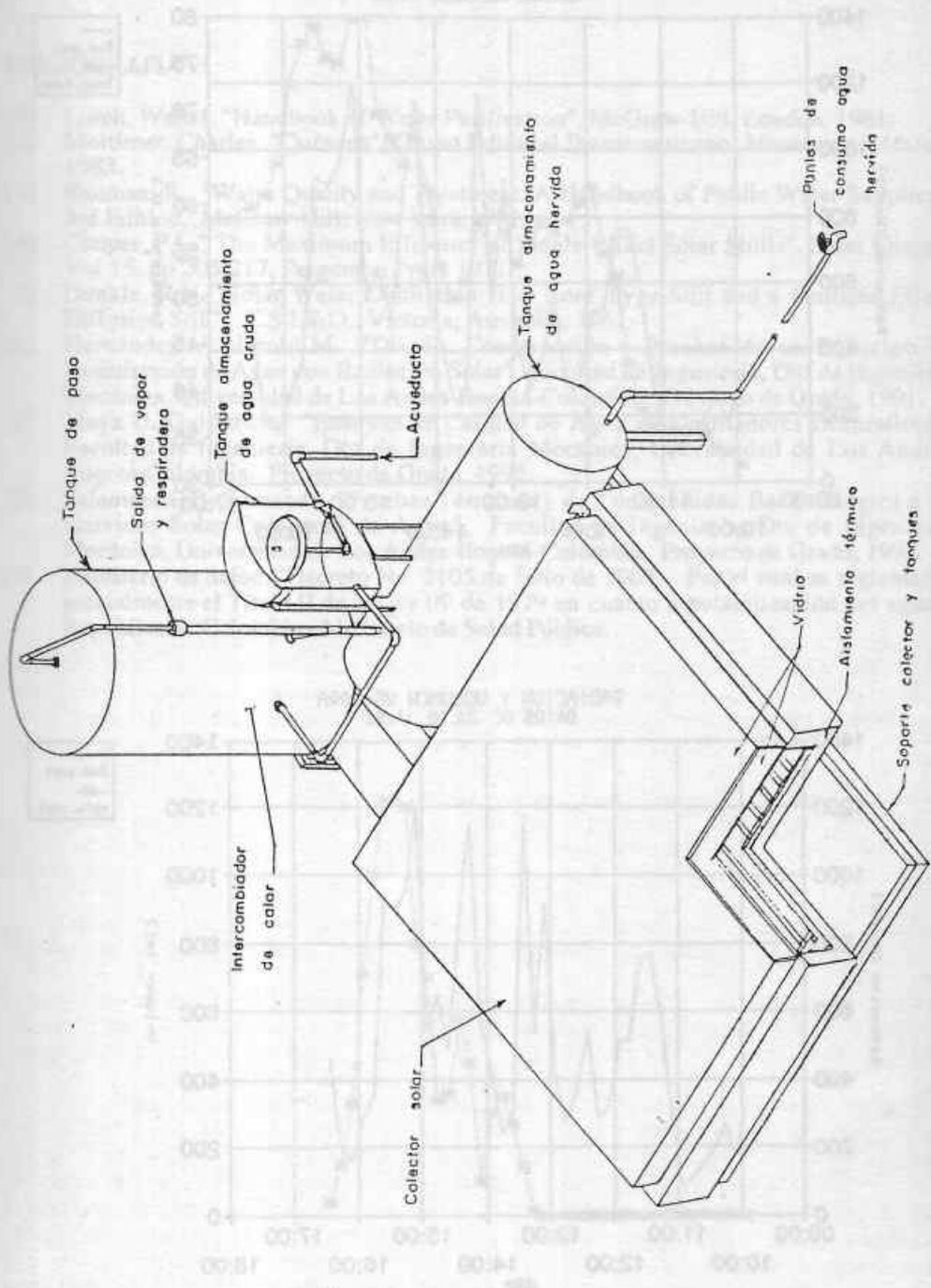


FIGURA 10- HERVIDOR SOLAR

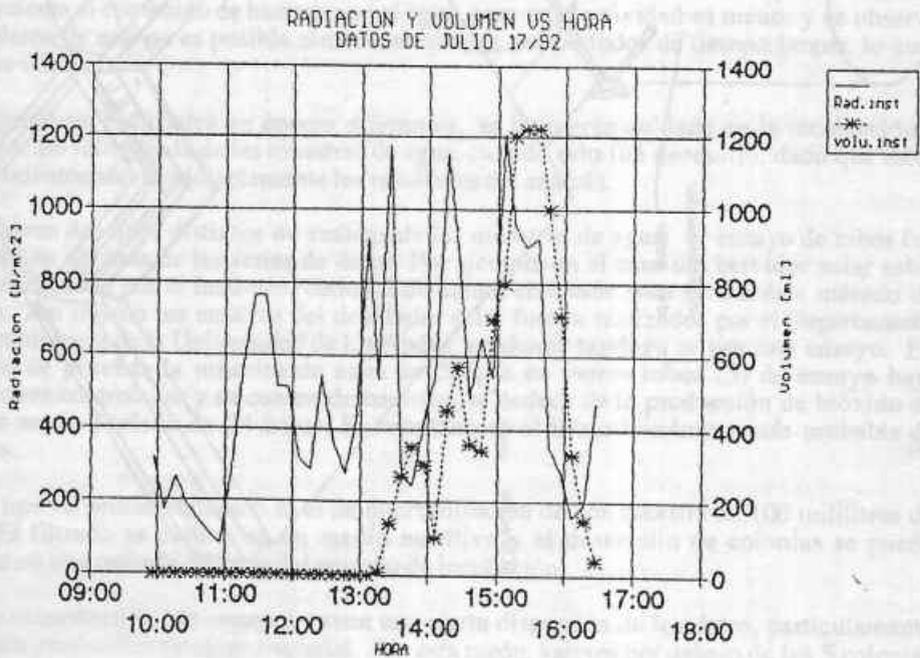
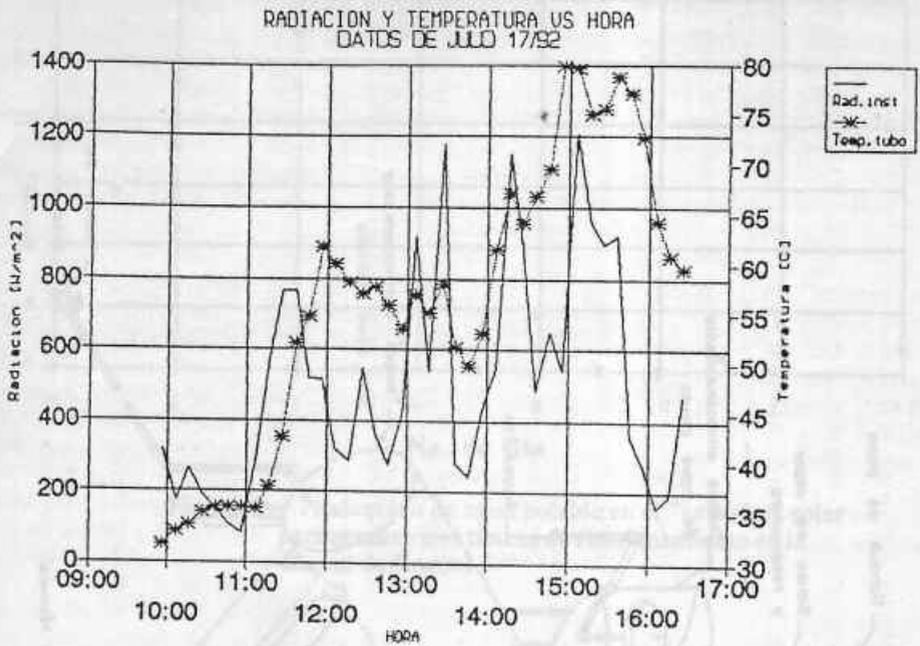


FIGURA 11

por cada 100 mililitros son relativamente inciertos, siendo este un límite de discriminación de los métodos usados.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Lorch, Walter. "Handbook of Water Purification", McGraw-Hill, London, 1981.
- [2] Mortimer, Charles. "Química", Grupo Editorial Iberoamericano. Monterrey, México, 1983.
- [3] Bauman, R. "Water Quality and Treatment: A Handbook of Public Water Supplies". 3rd Edition. McGraw-Hill, New York 1971.
- [4] Cooper, P.I. "The Maximum Efficiency of Single Effect Solar Still". Solar Energy, Vol 15, pp 205-217, Pergamon Press 1971.
- [5] Dunkle, R.V. "Solar Water Distillation: The Roof Type Still and a Multiple Effect Diffusion Still", C.S.I.R.O., Victoria, Australia, 1961.
- [6] Hernández V. Harold M. "Diseño, Construcción y Pruebas de un Prototipo de Desinfección de Agua con Radiación Solar", Facultad de Ingeniería, Dto de Ingeniería Mecánica, Universidad de Los Andes-Bogotá-Colombia. Proyecto de Grado, 1991.
- [7] Maya U. Guillermo. "Ensayos de Calidad de Agua en Destiladores Domésticos", Facultad de Ingeniería, Dto de Ingeniería Mecánica, Universidad de Los Andes-Bogotá-Colombia. Proyecto de Grado, 1992.
- [8] Salamanca, B. Fernando. "Pruebas Térmicas y de Confiabilidad Bacteriológica a un Hervidor Solar Compacto de Agua", Facultad de Ingeniería, Dto de Ingeniería Mecánica, Universidad de Los Andes-Bogotá-Colombia. Proyecto de Grado, 1992.
- [9] Ministerio de Salud. "Decreto No. 2105 de Julio de 1983 - Por el cual se reglamenta parcialmente el Título II de la Ley 09 de 1979 en cuanto a potabilización del agua". República de Colombia - Ministerio de Salud Pública.