

EVALUACIÓN DE ALTERNATIVAS PARA CLIMATIZACIÓN DE ESTANQUES CON ENERGÍA SOLAR PARA CULTIVO DE TILAPIA ROJA (*Oreochromis sp*), LOCALIZADOS EN LA ZONA FRÍA DEL VALLE DEL CAUCA, COLOMBIA

Francisco Javier Borja Gallardo¹; Luis Octavio González Salcedo² y Victoria Eugenia Quintero de Vallejo³

RESUMEN

*La investigación fue desarrollada para que la tilapia roja (*Oreochromis sp*), especie de pez más producida en Colombia, pueda ser explotada en lugares donde las condiciones óptimas para su normal desarrollo no son las adecuadas, como son las regiones altas con temperaturas por debajo de los 24 °C, aplicando metodologías relacionadas con el aprovechamiento de la energía solar. Las técnicas evaluadas fueron: climatización por medio de colectores solares, climatización por medio de manta térmica, climatización por medio de mangueras térmicas y climatización por medio de resistencias eléctricas. Se analizaron factores como funcionalidad, mantenimiento, limitaciones organizativas, espaciales, y costos.*

Palabras claves: Tilapia roja, climatización, estanques piscícolas, energía solar, manta térmica.

¹ Ingeniero Agrícola. Universidad Nacional de Colombia Sede Palmira. Facultad de Ciencias Agropecuarias. A.A. 0237. Palmira, Colombia.

² Profesor Asistente. Universidad Nacional de Colombia Sede Palmira. Facultad de Ingeniería y Administración. A.A. 0237. Palmira, Colombia. <logonzalezs@palmira.unal.edu.co>

³ Profesora Asistente. Universidad Nacional de Colombia Sede Palmira. Facultad de Ciencias Agropecuarias. A.A. 0237. Palmira, Colombia. <vequinterop@palmira.unal.edu.co >

Recibido: Abril 1 de 2005; aceptado: Mayo 30 de 2006.

ABSTRACT

EVALUATION OF ALTERNATIVES FOR AIR CONDITIONING OF PONDS WITH SOLAR ENERGY FOR CULTIVATION OF RED TILAPIA (*Oreochromis sp*), LOCATED IN THE COLD AREA OF THE CAUCA VALLEY, COLOMBIA

*The research was developed so that the red tilapia (*Oreochromis sp*), fish species that more taken place in Colombia can be exploited in regions where the good conditions for its normal development are not the appropriate ones as in the high regions with temperatures below the 24 °C, applying methodologies related with the use of the solar energy. The evaluated methodologies were: air conditioning by means of solar collectors, air conditioning by means of thermal blanket, air conditioning by means of thermal hoses and air conditioning by means of electric resistances. Factors like functionality, maintenance, organizational and space limitations, and costs were analyzed.*

Key words: Red tilapia, air conditioning, fishing ponds, solar energy, thermal blanket.

La tilapia roja (*Oreochromis sp*) por sus hábitos alimentarios, capacidad de adaptación, fácil reproducción, resistencia a enfermedades y posibilidades de soportar condiciones adversas en cultivo, con amplia tolerancia y rápido crecimiento, es ideal para producción en estanques bajo sistemas extensivos o intensivos. Las tilapias han demostrado ser peces con rápida maduración y numerosos desoves anuales, reproduciéndose en los estanques a una temprana edad (dos a tres meses) y cada treinta días si las temperaturas son aptas. Las tilapias son peces de origen tropical, por lo que sus mejores crecimientos se obtienen a temperaturas entre los 24 °C y los 30 °C. Por encima o por debajo, tanto la reproducción como el crecimiento pueden disminuir hasta detenerse completamente, se deben evitar adicionalmente oscilaciones diarias de temperatura por

encima de los 5 °C. La temperatura afecta directamente la tasa metabólica de los peces, cuando la una aumenta la otra también lo hace, y por consiguiente el consumo de oxígeno (Castillo 1994, Chimits 1998 y Fitzsimmons 2000).

La superficie del agua de los estanques absorbe (en el día) o pierde (en la noche) calor, en este caso las aguas calientes de la superficie se tornan menos densas que las aguas frías, ocasionando una estratificación termal en el cuerpo de agua, haciéndose muy evidente cuando las diferencias en densidad de los estratos superiores e inferiores se hacen muy grandes, neutralizándose toda probabilidad de mezcla por la acción del viento y corriendo el riesgo de tener capas sobresaturadas de gases tóxicos inmobilizadas. No es posible cultivar la tilapia en regiones

donde la temperatura sea menor de 22 °C, en cultivos a cielo abierto. Esta limitante convierte a la tilapia roja en especie potencialmente apta para cultivo en las zonas de mayores temperaturas de nuestro país; sin embargo propietarios de estanques en clima frío en algunas ocasiones hacen el intento de producir tilapia obteniendo muy lentos crecimientos y en algunas ocasiones fracasos en la siembra (Castillo 1994, Chimits 1998 y Castillo 2006a).

En Colombia, la tilapia roja (*Oreochromis* sp) es la especie de mayor producción en acuicultura comercial, en 1998 se produjeron 17665 toneladas de tilapia, cifra que supera la producción de trucha (6240 toneladas) especie que se cultiva en clima frío (Castillo, 1994 y Castillo 2006b).

Cultivo de la tilapia roja. Las tilapias son peces originarios del África y el cercano oriente. Estos peces han sido introducidos en forma acelerada hacia otros países tropicales y subtropicales del mundo ante la facilidad que presentan para su manejo, alta adaptabilidad a diferentes condiciones del medio, en algunos casos las más extremas, fácil reproducción, resistencia a enfermedades, alta productividad. Acepta todo tipo de alimentos naturales y artificiales, incluyendo los producidos por fertilización orgánica y química. Lamentablemente en algunos países y en especial los del tercer mundo, se les dio un manejo completamente errado y sus grandes ventajas se

convirtieron rápidamente en un serio problema para los medios naturales, ya fuera por el consumo indiscriminado de la flora acuática nativa o por su eficiente competencia con las especies ícticas nativas, las cuales han sido desplazadas gradualmente de su hábitat natural, ya sea por sobre pesca, la contaminación progresiva de las corrientes superficiales o su desecación por el desacertado manejo de las cuencas hidrográficas, permitiendo a las tilapias responder eficientemente ante estas condiciones adversas (Castillo 1994, Fitzsimmons 2000 y Castillo 2006a).

La tilapia roja fue introducida al departamento del Valle del Cauca en 1982 proveniente de los Estados Unidos. Se caracteriza por sus hábitos omnívoros y menor capacidad filtradora que sus especies ancestrales. Tiene una excelente presentación y óptimo rendimiento en cultivos semi-intensivos, intensivos y superintensivos. Su gran revolución como especie de cultivo en estanques comerciales se inicio a partir de 1979, con producciones por encima de las 120 ton/ha/año y crecimientos por encima de 800 gramos/año. Trabajándola en densidades de 5 a 10 peces/m², logra en 6 meses, tallas de mercado entre 400-600 gramos; con alta tecnología en estanques en tierra se han alcanzado densidades de 35 a 40 peces/m², estas densidades en los últimos años se han ido incrementando en la medida en que la tecnología y su manejo son más claros (Castillo 1994 y Castillo 2006b).

Por ser líneas de naturaleza híbrida obtenidas en confinamiento, prefieren las aguas lénticas (lagos, reservorios, lagunas, embalses y estanques), su rango óptimo para reproducción se encuentra en temperaturas entre 26 °C y 32 °C, y para crecimiento entre los 24 °C y 30 °C. En temperaturas por debajo de 24 °C el crecimiento se torna lento en la mayoría de las líneas híbrido, adicionalmente por debajo y por encima de las temperaturas óptimas son altamente susceptibles a las infecciones. Se considera a las líneas de tilapia roja altamente resistentes a la salinidad, con muy buenos resultados en su cultivo tanto en aguas salobres como saladas, basadas en la alta tolerancia de las especies parentales (Coche, 1993 y Ministerio de Agricultura y Ganadería 2001).

Climatización de estanques. El calentamiento del agua de los estanques a la intemperie, constituye otra interesante aplicación de la energía solar. El aprovechamiento de la energía solar puede lograrse mediante la aplicación de variadas técnicas, donde se puede conseguir una temperatura estable para los estanques. A diferencia de las aplicaciones convencionales de obtención de agua caliente con energía solar, en la climatización de estanques no es necesario utilizar ningún tipo de intercambiador de calor ni acumulador, circulando el agua del estanque directamente por los colectores. Los colectores son de materiales adecuados para los fines a que están

destinados, casi siempre de caucho o de plástico (generalmente polipropileno o polietileno) sin ningún tipo de cubierta, carcasa ni material aislante, es decir, prácticamente están contruidos por la placa captora desnuda. Esto es posible porque la temperatura de trabajo en ningún caso va a superar los 30 °C, y a esta temperatura, las pérdidas por radiación y conducción son muy pequeñas, permitiendo prescindir de cubiertas y aislamientos. Así se consigue reducir el precio por metro cuadrado de colector sin perjuicio del rendimiento del mismo, el cual cuando se trabaja a temperaturas inferiores a 30 °C, es incluso superior al de los colectores con cubierta, ya que no existen pérdidas por reflexión y transmisión en la misma. El requisito de economía en colectores es fundamental para que este tipo de instalaciones sea rentable, pues, suelen necesitarse áreas grandes de captación, incluso en casos extremos más que la propia superficie del estanque (Duffie y Beckman 1980 y Meyer y Mejía 1989).

Este tipo de colectores incorporan en el proceso de fabricación sustancias que los protegen de la tendencia natural de los plásticos a degradarse bajo la acción de los rayos ultravioleta. Se trata de aditivos como los empleados en los cables telefónicos a la intemperie, que hace al polímero opaco a la luz ultravioleta, evitando su penetración bajo la superficie, donde se produce la degradación. También lleva otros aditivos para

preservarlo contra los agentes químicos empleados en la purificación del agua de los estanques. Estos colectores, al no ser rígidos, necesitan de un bastidor, aunque también pueden colocarse directamente sobre un tejado o cubierta de cualquier tipo, o incluso sobre el suelo, pues, al ser flexibles, absorben las pequeñas irregularidades de la superficie en la cual descansan. Una ventaja adicional de este tipo de colectores es su aceptable resistencia a las posibles heladas nocturnas (Meyer y Mejía 1989 y Castro y Colmenar 2000).

Características de la instalación.

Para mantener la mayor eficiencia climática hay que evitar que la temperatura en los colectores sobrepase los 30 °C, temperatura por otra parte totalmente innecesaria, ya que las condiciones de confortabilidad del agua se alcanzan a temperaturas inferiores. Es pues importante que el salto térmico en el colector sea muy pequeño y, para ello, el caudal circulante por el mismo ha de ser alto, del orden de los 300 litros/ hora por cada m² de colector para el caso de estanques pequeños, pudiendo ser algo menor para instalaciones grandes. Cuando se impulsa el agua a través de los colectores, es preciso asegurarse que la bomba tiene la suficiente potencia para suministrar el caudal mínimo necesario, de acuerdo con las especificaciones del fabricante (datos de pérdida). A falta de datos, puede suponerse una pérdida de carga por m² de colector de 20 cm de columna de agua cuan-

do el caudal sea de 150 litros/h y de 60 cm cuando el caudal sea de 300 litros/h (Meyer y Mejía 1989 y Ferrando 1999).

El filtro ha de colocarse siempre entre la bomba y los colectores y el sentido de la corriente ha de ser: bomba → filtro → colectores, para evitar que la resistencia de este origine una sobre presión perjudicial para los colectores. En la instalación se destaca el control automático que impide al agua pasar por los colectores en el caso de que la temperatura de el estanque alcance los 28 °C, o bien la temperatura de la misma, sea superior a la medida en el propio colector (caso frecuente en intervalos nublosos); otros sistemas accionan la válvula de control cuando la intensidad de la radiación sobre los colectores baja a un mínimo prefijado. Todas las tuberías suelen ser de PVC y de gran diámetro, a fin de conseguir un buen caudal con la menor pérdida de carga posible, no necesitando estas, por lo general, ningún tipo de aislamiento térmico (Meyer y Mejía 1989 y Ferrando 1999).

Cálculo de la superficie colectora.

La temperatura ideal del agua se sitúa generalmente en el intervalo de los 24 °C a los 27 °C. Una temperatura superior a los 27 °C resulta muy elevada. A efectos de cálculo se elige como temperatura objetivo la de 27 °C. El requisito en que se basa esta hipótesis es el de conseguir que la temperatura del agua durante todos los meses sea de 27 °C. Un

dimensionamiento que asegure una temperatura de 27 °C en periodos de invierno hará que, si se mantienen los colectores solares en pleno servicio durante los periodos de verano, la temperatura del agua suba por encima de este valor, cosa no deseable. Para evitar esto, se deberá anular la circulación a través del circuito de los colectores siempre que sea necesario e incluso, en aquellos días de mayor irradiación y temperatura, esta medida puede no ser suficiente. Se deberá entonces hacer funcionar el sistema solar durante la noche para que, forzando la circulación del agua recalentada del estanque a través de los colectores, lograr un cierto enfriamiento de la misma, al producirse una pérdida neta de calor en los colectores por radiación hacia el espacio, sin que simultáneamente reciban ninguna energía del sol, como sucedería durante el día (Meyer y Mejía 1989 y Montelier, Borroto y Lapido 2006).

Para mantener una temperatura del agua estabilizada en torno a los 27 °C durante el invierno, las pérdidas de calor que, por diversos efectos, ha de sufrir el agua del estanque a lo largo de 24 horas, han de ser exactamente compensadas por las aportaciones energéticas, tanto directas de los rayos solares al incidir sobre la superficie del agua, como las debidas a los colectores solares. Por tanto, se detallarán las diferentes formas por las que un estanque al aire libre pierde calor, haciendo que la temperatura del agua tienda a disminuir.

En primer lugar, el agua pierde energía por radiación hacia la atmósfera. Estas pérdidas son mas acentuadas por la noche, al ser la temperatura media de la atmósfera sensiblemente menor que la del día (Meyer y Mejía 1989 y Lane 2002).

También existen pérdidas por evaporación, ya que para pasar del estado líquido al de vapor, el agua necesita una apreciable cantidad de energía por gramo evaporado, la cual obtiene a expensas del resto del agua líquida. El fenómeno de la evaporación se produce continuamente, pero depende fuertemente del grado de humedad atmosférico, de la temperatura del aire y de la velocidad del viento. Se producen pérdidas por convección al tocar muy suavemente el aire constantemente la superficie del agua y que también dependen fundamentalmente de la velocidad del viento. Estas pérdidas pueden ser negativas en algunas ocasiones, es decir, el agua puede ser calentada por el aire en el caso de que este se encuentre a una temperatura superior a 27 °C. Por último, existen pequeñas pérdidas por conducción a través del fondo y paredes laterales del estanque, pero son despreciables frente al valor de las pérdidas anteriormente descritas (Meyer y Mejía 1989 y Lane 2002).

El cálculo analítico preciso de cada uno de los diferentes tipos de pérdidas es complejo y prácticamente inviable, pues los diferentes parámetros que intervienen son, en si

mismos, difíciles de conocer y además varían de un día a otro e incluso de una hora a otra. Por ello, se ha desarrollado un método semi-empírico que tiene en cuenta todos los posibles valores medios de dichos parámetros, llegando a obtenerse tablas que resumen los resultados finales de muchas medidas y consideraciones teórico prácticas; éstas expresan numéricamente el valor medio más probable de los diferentes tipos de pérdidas por cada m² de superficie del estanque en función de las variables más significativas, con precisión suficiente para la práctica totalidad de los casos que en la realidad pueden presentarse de un estanque al aire libre. De esta manera el proceso de cálculo se simplifica al máximo, pues el proyectista únicamente ha de consultar las tablas, las cuales han sido comprobadas durante varios años, contrastando datos experimentales recogidos de diferentes zonas climáticas (Meyer y Mejía 1989 y Lane 2002).

Para la confección de las tablas de pérdidas se consideró un estanque de fondo claro, lleno de agua hasta 40 cm del borde, con una profundidad de 2 m y ubicado en un terreno libre de obstáculos y, por tanto, desprotegida de la acción del viento (Ministerio de Agricultura y Ganadería, 2001). En la práctica, los valores de las pérdidas, sobre todo las debidas a la convección y evaporación, pueden resultar ligeramente inferiores con solo disponer algún elemento de protección para el viento (muretes,

setos) situado estratégicamente, teniendo en cuenta la dirección predominante del mismo (Meyer y Mejía 1989 y Lane 2002).

Uso de manta térmica. Es efectivo cubrir durante la noche la superficie del estanque con una manta aislante de plástico; de esta forma se anulan las pérdidas por evaporación y se reducen muy considerablemente las de radiación y convección. Existen en el mercado varios tipos de mantas para estanques. Las más sencillas están fabricadas de plástico transparente con burbujas de aire, similar a las láminas utilizadas para envolver objetos delicados en embalajes. Para mayor comodidad, la manta se suele recoger enrollándose alrededor de un eje situado en uno de los laterales del estanque. Otra ventaja adicional de la manta es que, mientras está puesta, evita que la suciedad, hojas y objetos se depositen en el estanque y, además, constituye una medida de seguridad si en el lugar hay niños pequeños que por accidente o descuido puedan caer al agua (Meyer y Mejía 1989 y Ferrando 1999).

El uso de la manta por las noches a veces es suficiente por sí solo para conseguir una temperatura media del agua aceptable, sin necesidad de recurrir a la energía solar ni a ninguna otra fuente de energía, ya que minimiza las pérdidas de calor nocturnas que son las más importantes. Si se combina con un sistema de colectores solares, la manta supone ahorrarse una buena cantidad de me-

tros de los mismos, según se comprobará al manejar las tablas, por lo que aun teniendo en cuenta que las mantas térmicas de calidad son caras, la inversión es rentable. Su uso es, pues, recomendado en casi todos los casos, incluso en el de estanques cubiertos, pues elimina la evaporación nocturna, haciendo innecesaria la ventilación (Meyer y Mejía 1989 y Ferrando 1999).

MATERIALES Y MÉTODOS

Descripción de la zona de estudio.

El proyecto se desarrolló en un predio localizado en la Vereda los Laureles, corregimiento de La Elvira, municipio de Santiago de Cali sobre la Cordillera Occidental colombiana, a un costado de la quebrada Las Dos Margaritas. El terreno tiene una extensión de 6115 m², localizando el estanque sobre un área de 170 m² a una altura de 1849 msnm, con una topografía típica de montaña, con pendientes naturales que sobrepasan el 50 % de inclinación (Borja 2003 y Borja, González y Quintero 2004, 2006).

Climatología. De acuerdo con los datos climatológicos de la estación hidrológica San Pablo, ubicada en cercanías a la zona de estudio, se presenta una precipitación anual promedio de 1574 mm. La humedad relativa se estima que es de alrededor del 85 %. La temperatura está dada fundamentalmente por la posición latitudinal del lugar y por su altura

sobre el nivel del mar; para esta zona la temperatura promedio es de 17 °C. Se presenta nubosidad constante durante la casi totalidad del año, influenciando en las zonas de vida que allí prosperan. Existen dos clases de corrientes adiabáticas; la primera y la más importante es la que se dirige de la parte alta de la cordillera hacia el valle y que se presenta, generalmente entre las 3 y las 6 pm, los vientos tienen una dirección O-E y alcanzan velocidades de 3 a 4 m/s; la segunda corriente, de menor importancia, es la que en las horas de la mañana se dirige desde el valle hacia la cordillera, esta corriente tiene sentido inverso a la anterior y presenta menor intensidad y velocidad (Borja, 2003 y Borja, González y Quintero 2004, 2006).

Cálculo de las pérdidas de calor. Las pérdidas diarias por radiación, evaporación y convección por cada metro cuadrado de estanque, se calcularon a partir de los datos mostrados en las Tablas 1, 2 y 3, respectivamente. Las Tablas 2 y 3, muestran para los vientos predominantes, dos valores, el inferior representa las pérdidas en el caso de utilizar la manta térmica desde las 8 de la noche hasta las 8 de la mañana siguiente. El viento predominante en la zona se determinó de acuerdo con la experiencia de los habitantes del lugar. Se ha tenido en cuenta los periodos en los cuales los vientos no suelen ser demasiado fuertes, por lo que en la mayoría de los casos basta con usar las columnas de la izquierda (viento muy débil o flojo). En cuanto al grado de humedad, se han clasificado las posi-

bles zonas según la humedad relativa del aire en estos mismos periodos de la siguiente forma: 35 % - 45 % corresponde a muy seca, 45 % - 55 % a seca, 55 % - 65 % a una media, 65 % - 75 %

a una húmeda y más del 75 % a una muy húmeda (Centro de Estudios de la Energía Solar (CENSOLAR) 1993a, Borja 2003 y Borja, González y Quintero 2004, 2006).

Tabla 1. Pérdidas por radiación en estanques piscícolas, utilizando manta térmica (cmt) y sin utilizar manta térmica (smt) en MJ/m².

T °C	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
smt	14,6	14,1	13,5	13	12,5	12	11,4	10,8	10,3	9,7	9,1	8,5	7,9	7,3	6,7	6
cmt	9,6	9,2	8,9	8,5	8,2	7,8	7,5	7,1	6,7	6,3	5,9	5,5	5,1	4,7	4,2	3,8

Tabla 2. Pérdidas por evaporación en estanques piscícolas (MJ/m²).

Viento predominante	Nulo o muy débil	Flojo	Moderado	Moderadamente fuerte
Muy seco	7,3	9,1	15,1	21,2
	4,4	5,4	9,1	12,7
Seco	6,5	7,8	12,5	17,3
	3,9	4,7	7,5	10,4
Medio	5,6	6,5	9,9	13,4
	3,4	3,9	6	8
Húmedo	4,8	5,2	7,3	9,5
	2,9	3,1	4,4	5,7
Muy húmedo	3,8	3,9	4,8	5,6
	2,3	2,3	2,9	3,4

Una vez halladas las pérdidas totales (P) por m², resultante de la suma de las pérdidas correspondientes a cada una de las tablas, se procedió a calcular la radiación solar directa que el estanque recibirá a lo largo del día b. El estanque es como un gran colector solar horizontal de área (A) expuesto a una irradiación por m² diaria (H). Las pérdidas por reflexión (aproximadamente el 8 %) en la superficie del agua, así como las

sombras parciales causadas por el borde del estanque y otras pérdidas de menor cuantía, hacen que se recomiende suponer que la energía neta directamente aportada al agua sea igual a 0,85H. Por supuesto, si el estanque recibe sombras de árboles o construcciones en horas en que la radiación solar es apreciable, el coeficiente que multiplica a H todavía será menor, quizás igual a 0,80 o 0,75. En algunas regiones de clima

muy favorable la energía directa 0,85HA puede ser mas o menos igual o incluso superior a la perdida total (PA), por lo que se deduce de inmediato que, en dichos supuestos, no se necesitarán colectores solares, bastando la aportación solar natural para conseguir la temperatura reque-

rida. Normalmente, dicha aportación será inferior a las perdidas totales (PA), así que la diferencia entre ambas cantidades será la energía (Ec) que deben suministrar los colectores solares (CENSOLAR 1993a, Borja 2003 y Borja, González y Quintero 2004, 2006):

$$E_c = PA - 0,85 HA = (P - 0,85 H) A \quad (1)$$

Tabla 3. Pérdidas por convección, en estanques piscícolas (MJ/m²).

Temperatura del viento predominante T (°C)	Nulo o muy débil	Flojo	Moderado	Moderadamente fuerte
15	11,3	16,3	20,0	25,1
	6,2	8,9	11,0	13,7
16	10,5	15,2	18,7	23,3
	5,7	8,2	10,1	12,6
17	9,7	14,0	17,3	21,6
	5,2	7,5	9,2	11,5
18	8,9	12,9	15,9	19,9
	4,7	6,8	8,3	10,4
19	8,2	11,8	14,5	18,1
	4,2	6,0	7,4	9,3
20	7,4	10,7	13,1	16,4
	3,7	5,3	6,5	8,2
21	6,6	9,5	11,8	14,7
	3,2	4,6	5,7	7,1
22	5,8	8,4	10,4	13,0
	2,7	3,9	4,8	6,0
23	5,1	7,3	9,0	11,2
	2,2	3,2	3,9	4,9
24	4,3	6,2	7,6	9,5
	1,7	2,4	3,0	3,7
25	3,5	5,1	6,2	7,8
	1,2	1,7	2,1	2,6
26	2,7	3,9	4,8	6,0
	0,7	1,0	1,2	1,5
27	1,9	2,8	3,5	4,3
	0,2	0,3	0,3	0,4
28	1,2	1,7	2,1	2,6
	-0,3	-0,4	-0,5	-0,7
29	0,4	0,6	0,7	0,9
	-0,8	-1,2	-1,4	-1,8
30	-0,4	-0,6	-0,7	-0,9
	-1,3	-1,9	-2,3	-2,9
31	-1,2	-1,7	-2,1	-2,6
	-1,8	-2,6	-3,2	-4,0
32	-1,9	-2,8	-3,5	-4,3
	-2,3	-3,3	-4,1	-5,1

Una vez halladas las necesidades energéticas (E_c), se procedió a calcular el número de m^2 de superficie de los colectores, teniendo en cuenta que la temperatura de trabajo de los mismos es de $27\text{ }^\circ\text{C}$ y que la inclinación idónea se sitúa en torno a los 35° , aunque es frecuente que, por motivos de economía, los colectores se dispongan horizontalmente, evitándose el uso de una estructura metálica. Por otra parte, al ser estos flexibles, pueden adaptarse bastante bien al terreno, aunque este no sea perfectamente plano (CENSOLAR 1993a, Borja 2003 y Borja, González y Quintero 2004, 2006).

Determinación del colector. El tipo de colector que se utilizó, escogido por catálogo, es el modelo UNISOLAR 4000, de placa absorbente con tratamiento superficial, de cubierta transparente de cristal templado de 4 mm

de espesor, dimensiones de apoyo de $1050\text{ mm} \times 2120\text{ mm} \times 80,2\text{ mm}$ y superficie útil de captación de $2,13\text{ m}^2$, habiéndose determinado por datos suministrados por el fabricante, que su rendimiento es aproximadamente del 83 % (CENSOLAR 1993a, Borja 2003 y Borja, González y Quintero 2004, 2006).

Disposición de los colectores. Los colectores se situaron de tal forma que a lo largo del periodo anual de utilización aprovecharan al máximo la radiación solar disponible. En general se procura que la radiación solar incida perpendicularmente sobre la superficie del colector al medio día solar del día medio de la época de utilización del equipo. Las recomendaciones sobre orientación se muestran en la Tabla 4 (CENSOLAR 1993a, Borja 2003 y Borja, González y Quintero 2004, 2006).

Tabla 4. Indicaciones de orientación que se suelen dar a los colectores, según la época del año y el uso a que se le designen.

Utilización	Ángulo de inclinación
Todo el año	Latitud del lugar + 10°
Invierno (calefacción)	Latitud del lugar + 20°
Verano (piscinas descubiertas)	Latitud del lugar - 5°

Para una latitud en la zona rural de Santiago de Cali de 4° y con el incremento de 10° recomendados en la Tabla 4, teniendo en cuenta que el proyecto opera durante todo el año, la inclinación solar para los colectores se recomendaron de 15° . La separación

entre líneas de colectores se estableció de tal forma que al medio día solar del día mas desfavorable (altura solar mínima) del periodo de utilización, la sombra de la arista superior de una fila ha de proyectarse como máximo; sobre la arista inferior

de la fila siguiente. En equipos que se utilizan todo el año o en invierno, esta altura solar mínima (h_o) tiene el siguiente valor (CENSOLAR 1993a, Borja 2003 y Borja, González y Quintero 2004, 2006):

$$h_o = (90^\circ - \text{latitud del lugar}) - 23,5^\circ \quad (2)$$

Para la distancia mínima entre hileras de colectores queda así:

$$d = (\text{sen } \alpha / \tan h_o) + \cos \alpha \quad (3)$$

Para el proyecto, se calcularon los siguientes valores:

$$h_o = (90^\circ - 4^\circ) - 23,5^\circ$$

$$h_o = 62,5^\circ$$

$$d = (\text{sen } 15 / \tan 62,5) + \cos 15$$

$$d = 1,10 \text{ m.}$$

Datos para el cálculo de la climatización.

- Área del estanque: $17 \times 10 = 170 \text{ m}^2$.

- Localidad: Vereda Los Laureles (Área rural Santiago de Cali).
- Latitud: 4° .
- El área no recibe sombras.
- El viento es de clase moderada.
- El grado de humedad es muy alto (85 %).
- Temperatura media durante las horas del sol: 24°C .
- Área del colector: $2,13 \text{ m}^2$.
- Rendimiento del colector: 83 %.
- Aportación solar directa en la zona durante el año (Tabla 5) (Rodríguez y González 1992, CENSOLAR 1993b y Gorya, Pincay y Roncancio 2004)).
- Factor de corrección k para superficies inclinadas para una latitud de 4° (Tabla 6) (Rodríguez y González 1992, CENSOLAR 1993b y Gorya, Pincay y Roncancio 2004)).
- Factor de correlación para la aportación solar: 1,05.

Tabla 5. Valores medios de irradiación MJ/m^2 solar sobre suelo horizontal para la ciudad de Santiago de Cali, Colombia.

Ciudad	Latitud	Mes											
		Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Cali	4°	16,2	16,6	17,4	16,6	16,5	15,9	18,5	18,5	16,9	16,3	15,8	15,9

Tabla 6. Factor de corrección k para una inclinación de 15° .

Inclinación	Mes											
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
15°	1,05	1,02	0,98	0,94	0,9	0,88	0,9	0,93	0,98	1,03	1,06	1,07

CÁLCULOS Y RESULTADOS

Cálculo de pérdidas sin el uso de manto térmico

- Pérdidas por radiación: 9,7 MJ/m².
- Pérdidas por convección: 7,6 MJ/m².
- Pérdidas por evaporación: 4,8 MJ/m².
- Total de pérdidas: 22,1 MJ/m².

Para el mes de enero se obtuvo:

Aportación solar directa:

$$0,85 \times H = 0,85 \times 16,2 \times 1,05 = 14,45 \text{ MJ/m}^2.$$

$$\text{Déficit energético: } 22,1 - 14,45 = 7,64 \text{ MJ/m}^2.$$

Corrección de inclinación: 1,05

Energía aportada por cada metro cuadrado de colector inclinado: $0,83 \times 1,05 \times 16,2 = 14,11 \text{ MJ/m}^2$.

Déficit energético:

$$E_c = 7,64 \text{ MJ/m}^2 \times 170 \text{ m}^2 = 1298,8 \text{ MJ}.$$

Se requirió por lo tanto, una superficie colectora de: $1298,8/14,11 = 92 \text{ m}^2$, (43 colectores de 2,13 m² cada uno).

Los cálculos de análisis del mes de enero se realizaron en forma análoga para los demás meses del año. El mes de junio exigió el mayor número de colectores (54); razón por la cual se tomó este número, como el ideal para el proyecto (Borja 2003 y Borja, González y Quintero 2004, 2006).

Cálculo de pérdidas utilizando la manta térmica

- Pérdidas por radiación: 6,3 MJ/m².
- Pérdidas por convección: 3,0 MJ/m².

- Pérdidas por evaporación: 2,9 MJ/m².
- Total de pérdidas: 12,2 MJ/m².

Para el mes de enero se obtuvo:

Total de pérdida en MJ/m² - Energía aportada por cada m² de colector inclinado.

$$12,2 \text{ MJ/m}^2 - 14,11 \text{ MJ/m}^2 = -1,91 < 0.$$

El procedimiento de cálculo se repitió para todos los meses del año, obteniéndose para el mes de junio (crítico) un valor de déficit energético de 0,59 MJ/m². Con los resultados obtenidos se concluyó que utilizando la manta térmica no es necesario emplear colectores en ninguno de los meses del año, ya que en ninguno de éstos, existen pérdidas, con excepción de junio, y para este mes, el déficit energético permite tener una temperatura cercana a la óptima para el desarrollo del cultivo de la tilapia roja.

Climatización por medio de mangueras. Esta alternativa se ideó considerando que la masa de agua del estanque fuera calentada por una serie de mangueras de polietileno negro, las cuales serían atravesadas en el fondo del estanque para que la distribución de calor fuera uniforme. La calefacción del agua se realiza por intermedio de paneles solares conectados a la manguera. La anterior propuesta se descartó debido a que el material con el que están hechas las mangueras (polietileno) no es un buen conductor de calor, por con-

siguiente la temperatura deseada para el estanque es difícil de alcanzar, por otra parte su instalación en el fondo del estanque dificulta enormemente las labores de manejo y cosecha (Borja 2003 y Borja, González y Quintero 2004, 2006).

Climatización por intermedio de resistencias eléctricas. Esta alternativa se fundamenta en el principio de climatización de piscinas, que en su mayoría funcionan con resistencias eléctricas especialmente aisladas para evitar choques eléctricos, las cuales vienen directamente fabricados para un consumo de energía asignado, dependiendo de los volúmenes de agua a calentar. Esta posibilidad se descartó debido a la baja eficiencia de los paneles (10 %) y al alto consumo de energía eléctrica que desfavorece la utilización de paneles fotovoltaicos, ya que necesita gran cantidad de éstos para satisfacer la demanda energética que el método requiere para su funcionamiento; por otro lado se tuvo en cuenta el alto costo de las resistencias (Borja 2003 y Borja, González y Quintero 2004, 2006).

CONCLUSIONES

A pesar de que el sol emite una gran cantidad de energía radiante, parte de esta radiación solar es absorbida por la atmósfera y parte es reflejada nuevamente al espacio, por consiguiente la diferencia es transmitida a la tierra, de la cual solamente puede

ser aprovechada alrededor del 10 % de ella; adicionalmente, de la fracción aprovechable en la superficie terrestre, un sistema fototérmico posee una eficiencia del orden del 50 %, y un sistema fotovoltaico posee una eficiencia del orden del 15 %. El factor más importante que influye en la cantidad de energía solar incidente en una zona determinada es la proporción de días nublados que se dan al año, por tal motivo es importante que antes de iniciar un proyecto similar, sea de previo conocimiento el comportamiento de este fenómeno.

El uso de colectores solares es una opción que para la zona de estudio presenta inconvenientes tanto de tipo técnico porque se tendrían que utilizar un total de 54 colectores los cuales ocuparían un área plana adicional a la del estanque y con la cual no se cuenta, aunque podría utilizarse el área de la cubierta de la edificación aledaña al estanque, incorporando adicionalmente un montaje especial que permita soportar y sostener los colectores, así como darle la inclinación de diseño; y el inconveniente de tipo económico porque el costo para adquirir tal cantidad de colectores como para adecuar el terreno o fabricar y montar la estructura de soporte de los colectores sobre la cubierta sería bastante elevada.

Por el contrario el mejor método para lograr la climatización adecuada del estanque es por medio de la manta

térmica, la cual ofrece ventajas de tipo espacial ya que ocupa casi la misma área del estanque y a su vez es relativamente muy económica, así se obtendría la temperatura regulada y no se requeriría de colectores solares. Se descarta totalmente alternativas de climatización como las mangueras de polietileno ya que su eficiencia para conducir calor es demasiado baja y por lo tanto nunca se lograría alcanzar la temperatura deseada; en tanto que las resistencias eléctricas por su alto costo, no serían funcionales.

Se puede lograr con el sistema de manta térmica que especies de climas cálidos como la tilapia roja (*Oreochromis* sp) como otras mas, puedan adaptarse a regiones donde las condiciones ambientales no les sean favorables. El bajo costo de aplicar esta alternativa de climatización de estanques sería un estímulo muy importante para los interesados en la realización de este tipo de proyectos.

BIBLIOGRAFÍA

Borja G., F. J. 2003. Diseño modelo para una instalación de cultivo de tilapia roja, *Oreochromis* sp., en estanques climatizados con energía solar en la zona fría del Valle del Cauca. Palmira. 84 h.. Trabajo de grado Ingeniero Agrónomo. Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ciencias Agropecuarias.

Borja G., F. J.; González S., L. O. y Quintero de V., V. E. 2004. Diseño modelo de una instalación para

cultivo de tilapia roja (*Oreochromis* sp); en estanques climatizados con energía solar en la zona fría del Valle del Cauca. p. 1-6. En: Congreso Internacional sobre uso racional y eficiente de la energía, CIUREE (1: 2004: Santiago de Cali, Colombia). Memorias. Santiago de Cali: Universidad Autónoma de Occidente - RECIEE.

Borja G., F. J.; González S., L. O. y Quintero de V., V. E. 2006. Diseño modelo de estanques climatizados para el cultivo de tilapia roja, *Oreochromis* sp, localizados en la zona fría del Valle del Cauca, Colombia. En: Taller Internacional de Energía y Medio Ambiente (4: 2006: Cienfuegos, Cuba). Memorias. Cienfuegos, Cuba: Universidad de Cienfuegos Dr. Carlos Rafael Rodríguez – Centro de Estudio de Energía y Medio Ambiente (CEEMA).

Castillo, L. F. 1994. La historia genética e hibridación de la tilapia roja. Cali: Ideal, 330 p.

_____ 2006a. Tilapia Roja 2006: una evolución de 25 años, de la incertidumbre al éxito. Alevinos del Valle – Aquatic DEPOT S.A. de C.V. Disponible en Internet http://ag.arizona.edu/azaqua/ista/Colombia/TILAPIA_ROJA_2006.pdf. [Consultada: 11 Abr. 2006].

_____ 2006b. La importancia de la tilapia roja en el desarrollo de la piscicultura en Colombia. Asociación Real Cauca - Alevinos del Valle. Disponible en Internet <http://ag.arizona.edu/azaqua/ista/new/TilapiaColombia.pdf>. [Consultada: 11 Abr. 2006].

- Castro G., M. y Colmenar S., A. 2000. Energía solar térmica de baja temperatura. Sevilla, España: CENSOLAR – PROGENSA. 94 p.
- Centro de Estudios de Energía Solar. 1993. Instalaciones de energía solar. Curso programado. 6 tomos. Sevilla, España: ProgenSA. 54 p.
- Centro de Estudios de Energía Solar. 1993. Mean values of solar irradiation on horizontal surface. Sevilla, España: ProgenSA. 112 p.
- Chimits, P. 1998. La tilapia y su cultivo. En: Boletín de Pesca. Roma: FAO. Vol. 8, No.1; p. 1-33
- Coche, A. G. 1993. Construcción de estanques para la piscicultura de agua dulce: estructuras y trazados. Roma: FAO. 214 p.
- Duffie, J. A. and Beckman, W. A. 1980. Solar engineering of thermal processes. New York: Wiley Interscience. 137 p.
- Ferrando, J. 1999. Climatización ambiental y calentamiento de agua de piscinas cubiertas mediante bomba de calor. En: Gestión de Hoteles. Marzo – Abril. p. 50-53.
- Fiztsimmons, K. 2000. Tilapia: the most important aquaculture species in the 21st century. En: Fiztsimmons, K. and Filho, J.C. (eds). Tilapia Aquaculture in the 21st Century. p. 328-333. En: International Symposium on Tilapia in Aquaculture (5: 2000: Río de Janeiro, Brazil). Proceedings. Rio de Janeiro Panorama de Aquicultura Rio de Janeiro, Magazine.
- Gorya M., S.; Pincay, N. y Roncancio, C. E. 2004. Estado actual y proyección de la energía solar térmica en el Valle del Cauca. En: Congreso Internacional sobre uso racional y eficiente de la energía, CIUREE (1: 2004: Santiago de Cali, Colombia). Memorias. Santiago de Cali: Universidad Autónoma de Occidente - RECIEE.
- Lane, T. 2002. Solar hot water systems. Florida: Energy Conservation Services of North Florida. 177 p.
- Ministerio de Agricultura y Ganadería. 2001. Guía para el cultivo de tilapia en estanques. Disponible en Internet www.agronegocios.gob.sv/comoproducir/guias/TILAPIA.pdf. [Consultada: 11 Abr. 2006].
- Meyer, D. y Mejia, S. Climatización de piscinas. Madrid: s.n., 1989.
- Montelie H., S.; Borroto N., A. y Lapido R., M. 2006. Influencia de las principales variables climatológicas en la operación de los sistemas de climatización por agua helada. En: Taller Internacional de Energía y Medio Ambiente (4: 2006: Cienfuegos, Cuba). Universidad de Cienfuegos Dr. Carlos Rafael Rodríguez – Centro de Estudio de Energía y Medio Ambiente (CEEMA).
- Rodríguez M., H. y González B., F. 1992. Manual de radiación solar en Colombia: series sobre energía. Santafé de Bogotá: Rodríguez y González Editores. 98 p.