APROVECHAMIENTO DE LOS EFLUENTES DE REFRIGERACIÓN DE CENTRALES ELECTRICAS PARA ACUICULTURA ANIMAL

J. COLL MORALES

1. Interés actual del tema

Aproximadamente 30-40 por 100 de la energía total consumida en España se usa para la generación de energía eléctrica (1), un proceso cuya eficiencia es aproximadamente del 40 por 100. Como resultado, un 12-16 por 100 de la energía total se libera al ambiente como energía de desecho a través de los efluentes de refrigeración de centrales eléctricas. La necesidad de conservar el máximo de energía como consecuencia de la crisis energética, unido a la creciente importancia que se le está dando a la acuicultura como complemento a la pesca, hacen que la utilización de los efluentes de refrigeración de las centrales eléctricas para acuicultura sea un tema de actualidad.

Este mismo interés se ha venido demostrando a nivel internacional durante los últimos años. Especialmente durante 1980, tuvieron lugar, respectivamente:

— El Congreso anual de la World Mariculture Society, que se desarrolló en Nueva Orleans en Marzo y en el que, como en anteriores años, se presentaron numerosas comunicaciones sobre este tema (2).

— Las jornadas técnicas: "Nuevas posibilidades de la Acuicultura. Aprovechamiento de efluentes termales de las Centrales Eléctricas", que se desarrolló en España en Mayo, organizado por el Instituto Tecnológico para Postgraduados, con la participación del Massachussetts Institute of Technology y el Woods Hole Oceanographic Institution (3,4,5,6,7,8).

— Por último, el Simposio: "On new developments in the utilization of heated effluents and recirculation systems for the intensive Aquaculture", que se desarrolló en Noruega a finales de Mayo, organizado por la European Inland Fisheries Advisory Commission y la FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations). En más de 100 ponencias, se expusieron detalles sobre control de calidad de aguas, selección de centrales, equipos e ingeniería, unidades de recirculación, oxigenación, etc. (9). Entre otras, el simposio terminó con las conclusiones siguientes:

— Actualmente, la tecnología está más desarrollada de lo que en realidad se ha aplicado.

— La viabilidad económica de cada proyecto depende de la localidad, la especie y el uso que se le vaya a dar al producto.

— Puede predecirse bastante aproximadamente, con los datos actuales, la viabilidad de un determinado sistema. El mayor problema para hacer estas determinaciones parece estar en la escasez de datos locales, lo que puede solucionarse mediante las experimentaciones adecuadas "in situ".

— Deben establecerse controles adecuados tanto en la calidad del agua como en la calidad del producto, sobre todo si éste va a ser usado para consumo humano.

Aparte del interés general manifestado por estos organismos internacionales, el tema también interesa a las empresas eléctricas, debido principalmente a:

1. El indudable impacto positivo en la opinión pública (aprovechamiento de recursos naturales y energía, investigación y desarrollo, formación de profesionales, control de polución y contaminación, etc.).
2. Adelantarse a legislaciones futuras sobre efluentes, estableciendo bioindicadores.
3. Perspectivas comerciales.

A medida de ejemplo, según EPRI (Asociación de Empresas Eléctricas de U.S.A.), en el año 1980 existen un centenar de experimentaciones de este tipo (10). Los países que se encuentran más adelantados en el uso de efluentes para cultivos acuáticos son Japón, U.S.A. e Inglaterra, principalmente. Existen varias empresas que han llevado estas aplicaciones a escala comercial, por ejemplo: Long Island en U.S.A. con ostras, Shearwater Fish Farming Ltd. en Inglaterra con truchas, Weyerhaeuser Co. en U.S.A. con salmón, Marine Farms Ltd. en Inglaterra con ostras, y multitud de empresas en Japón con langostinos, ostras y pez limón, principalmente (11).

2. Características de los efluentes de refrigeración

La refrigeración en las centrales térmicas productoras de electricidad, es debida a la necesidad de condensar el vapor utilizado para la transformación de energía (Figura 1). La energía se obtiene bien quemando fósiles (carbonos o petróleos) o bien por desintegración radioactiva (Centrales Nucleares). En ambos casos, la liberación de la energía en la caldera se utiliza para la conversión de agua en vapor. El vapor de agua a presión mueve una turbina que, a través de un alternador, genera energía eléctrica con un 30-40 por 100 de rendimiento (3). El vapor resultante ha de convertirse en agua para cerrar el ciclo, aprovechando de esta forma su alta temperatura. Para condensar el vapor de agua, se utiliza agua procedente del ambiente como refrigerante. Este agua arrastra un 60-70 por 100 de la energía producida en forma de calor que se vierte de nuevo al ambiente (3,4). Debido a que la temperatura de vertido no puede ser demasiado elevada, pues ocasionaría problemas graves de contaminación térmica, los flujos de agua refrigerante han de ser elevados (del orden del millón de litros por minuto, según la potencia de la central) para mantener un incremento de temperatura a la salida del efluente alrededor de los 5°C (4).

Este funcionamiento hace que las centrales se sitúen a orillas del mar, ríos o pantanos (Figura 2). El vertido de los efluentes termales en el medio ambiente altera la ecología de la zona, si bien el incremento de temperatura puede manipularse de manera que resulte aprovechable e incluso beneficioso para el hombre, además de utilizar esa cantidad de energía que no tiene ningún otro uso. Otras soluciones para el problema de la refrigeración son el emplear torres de refrigeración (en cuyo caso la acuicultura tiene escaso interés) o bien el emplear estanques o lagos de disipación que son más controlables en cuanto a la temperatura del agua de vertido al medio y que son, en principio, aprovechables para la acuicultura (3,4,5).

La Figura 3 esquematiza las principales alternativas en la interfase acuicultura/efluentes. La acuicultura puede desarrollarse bien en el medio ambiente acuoso en el que se produce un incremento de temperatura, como consecuencia del vertido de los efluentes, o bien en estanques situados en tierra y por los que se divierta parte o todo

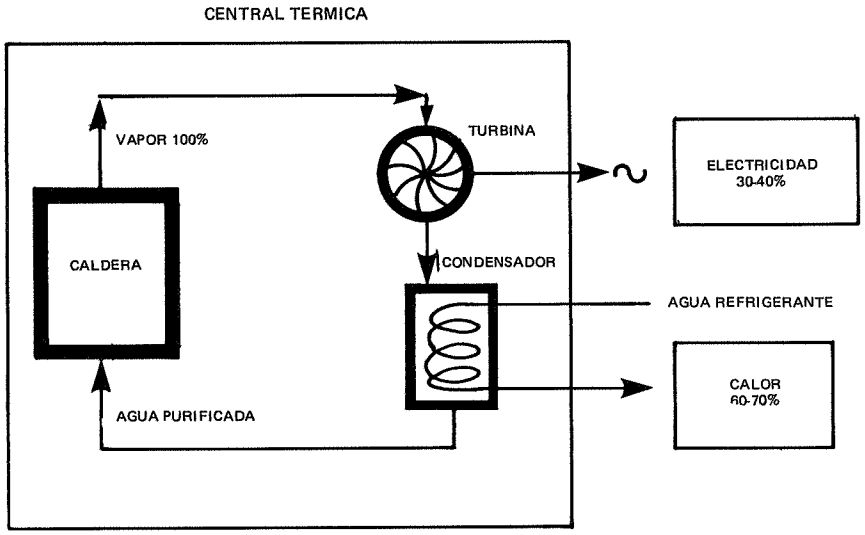

Fig. 1. Una central térmica se basa en un ciclo de conversión de energía calorífica en energía eléctrica.

La energía se encuentra almacenada en fósiles (carbones o petróleos) o en isótopos radioactivos (uranio). Su liberación mediante combustión o un reactor, produce la conversión de agua (baja temperatura) en vapor (alta temperatura y presión). El vapor de agua a presión mediante una turbina y un alternador produce energía eléctrica con un 30-40 por 100 de rendimiento. El vapor resultante se condensa mediante reducción de su temperatura con agua refrigerante para volver a la cadera. El rendimiento o aprovechamiento de la energía contenida en los fósiles o en los isótopos depende directamente de la diferencia de temperaturas entre el agua y el vapor. Debido a que el efluente no puede ser de una temperatura demasiado elevada (contaminación térmica), los flujos del agua refrigerante han de ser grandes para conseguir un buen rendimiento.

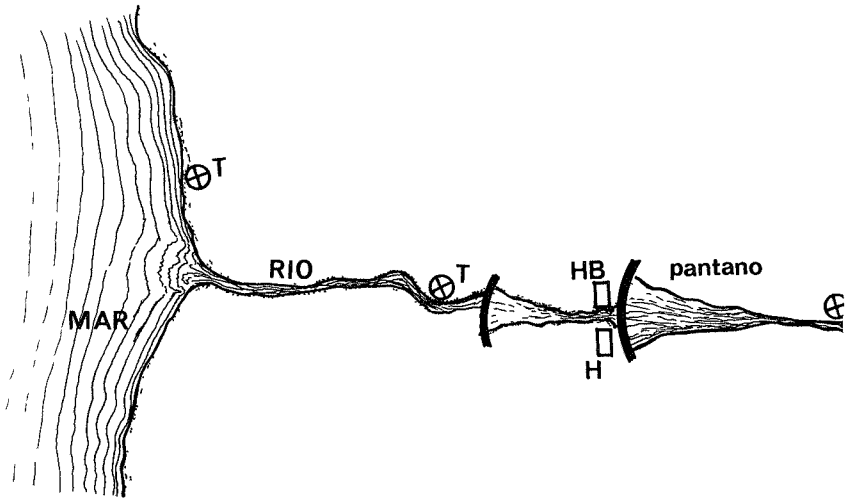

Fig. 2. Esquema de la situación de centrales térmicas (T) y centrales hidroeléctricas (H y HB - bombeo) respecto a la fuente del agua de refrigeración.

Las centrales hidroeléctricas están situadas, invariablemente, bajo la presa de un pantano. Las de bombeo están entre dos pantanos. Las térmicas pueden estar en el mar, en el río o en la cola de un pantano. Los casos especialmente favorables para la Acuicultura lo constituyen estos últimos ya que reúnen un gran volumen de agua (el pantano) y un efluente termal (flujo y temperatura).

el efluente. Desde otro punto de vista más biológico, pueden concebirse las siguientes alternativas:

1. La producción de alevines de especies comerciales (Hatchery), bien sea para venderlos para su engorde a cultivadores de la región, bien para repoblación de los ríos/mar o de los pantanos de las centrales hidroeléctricas (proyectos de aprovechamiento conjunto térmico-hidroeléctrico).

2. El engorde de especies comerciales.

3. El estudio, control y posible aprovechamiento de especies de interés comercial que se desarrollan naturalmente en el área donde se produce un incremento de temperatura, como consecuencia de los efluentes (12). Controlando la abundancia de la alimentación artificial y la oxigenación de estas aguas, puede, en principio, aumentarse la producción natural.

En la tabla 1 se han recopilado las características de 4 centrales térmicas españolas tomadas como representativas, de las aproximadamente 50 que existen en España. En esta tabla encontramos un nuevo factor a tomar en cuenta en el diseño de posibles aplicaciones en Acuicultura: las medidas antifouling y anticorrosivas (13,14). Estas medidas se concretan en el uso de sulfatos y cloro, bien sea continuamente a bajas concentraciones, bien intermitentemente a concentraciones más elevadas. Los dos productos mencionados suelen ser tóxicos para muchas especies biológicas, por lo que sus efectos o bien su eliminación deben de ser cuidadosamente estudiados antes de proceder al empleo de los efluentes. En relación con otras sustancias disueltas que los efluentes puedan llevar, hay que mencionar el caso de los metales pesados. Si bien las concentraciones de estos metales son muy pequeñas, dependiendo de las condiciones, algunos de los seres vivos son capaces de concentrarlos en sus tejidos, por lo que se hace necesaria una evaluación del posible aprovechamiento o peligro que pueda originarse (5).

Lo más característico del efluente de refrigeración es, sin lugar a dudas su temperatura (9). Un ejemplo de lo que es un efluente termal podemos observarlo en la figura 4 donde se comparan las temperaturas ambientales a lo largo del año con las temperaturas de vertido en la central de Mercer (véase abajo para más detalles). El perfil de temperaturas del efluente es paralelo al perfil de temperatura ambiental, pero con un incremento aproximado de

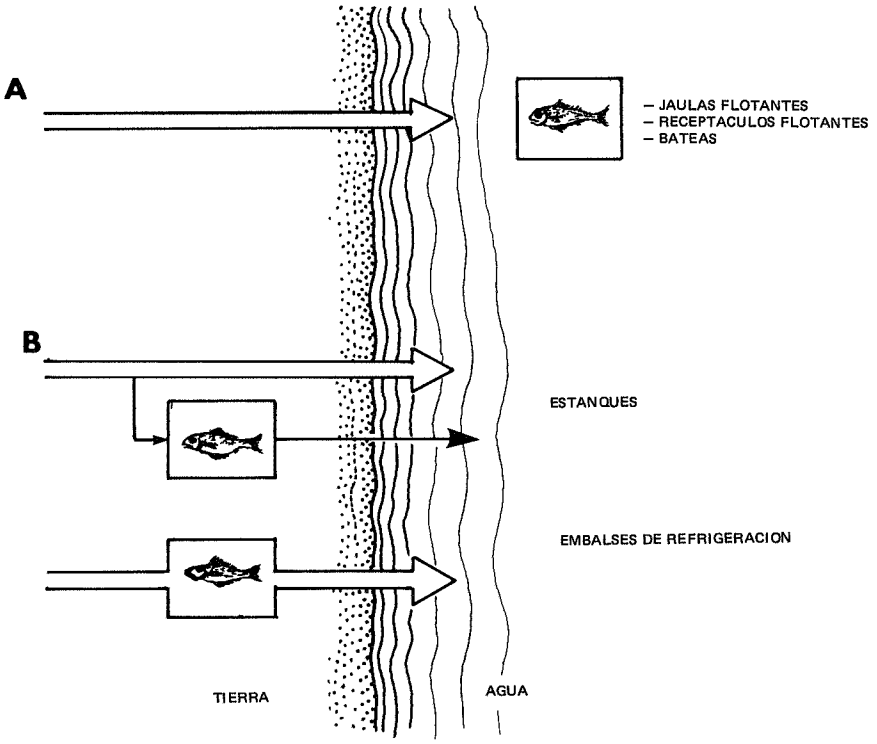

Fig. 3. Alternativas de disipación del calor y aprovechamiento para acuicultura. Existen principalmente dos alternativas: A) situar los cultivos en la boca del efluente sea en el mar o en el río o pantano y B) situar los cultivos dentro de tierra. La primera alternativa es, generalmente, más barata, pues evita costes de bombeo y construcción de estanques. La segunda alternativa puede beneficiarse de embalses ya construidos para la disipación de calor, en cuyo caso puede llegar a ser tan barata como la otra. En el caso B puede utilizarse todo el efluente a través del estanque o bien sólo parte de éste.

Tabla 1

Resumen de las características de los efluentes de Centrales Térmicas Españolas y temperaturas ambientales en el agua

Central	*Tempera. ambiente* ΔT	ΔT	*Agua*	*l/min caudal*	*Número de grupos*	*Anticorrosivo y Antifouling*
Cristóbal Colón (Huelva)	13-30	3-6°C	Mar	300.000	3	SO_4Fe
Puentenuevo (Córdobá)	4-28	6-14°C	Río	200.000	2	ClONa
Vandellós (Tarragona)	12-24	6-8°C	Mar	1.000.000	1	SO_4Fe
Sabón (La Coruña)	13-15	12-16°C	Mar	400.000	2	ClONa SO_4Fe

Se han escogido Centrales del Sur de España (Cristóbal Colón y Puente Nuevo), del Noroeste (Vandellós) y del Noroeste (Sabón) con variaciones ambientales de temperatura extrema. El aumento de temperatura oscila entre 3 y 14°C sobre la temperatura ambiente con una media de unos 8°C. El caudal del agua de refrigeración es de unos 500.000 l/min. Las medidas antifouling para los tubos de conducción son a base de sulfato de hierro o hipoclorito sódico.

unos 5°C. En España, perfiles análogos a los de la figura 4 pueden construirse en primera aproximación a partir de los datos de la figura 5, que contiene los perfiles más cálido y más frío de España. La variación máxima de temperatura está entre 12-15°C, lo que no representa extremos demasiados amplios (de 13 a 25°C y de 4 a 19°C. aproximadamente). Tomando en cuenta estos valores y el incremento medio que supone el efluente termal (unos 5–10°C) pueden diseñarse esquemas teóricos de aprovechamiento de los efluentes para acuicultura animal comparando las distintas posibilidades (15,16): selección de especies, selección de la época y duración del cultivo, simple o doble cosecha, etc., de tal manera que es posible optimizar en base a datos teóricos un posible aprovechamiento de los efluentes termales (tema en el que estamos trabajando actualmente).

De todo lo que hemos considerado anteriormente, se pueden sacar varias conclusiones en cuanto a los criterios de selección de una Central para aprovechamiento de sus efluentes termales en Acuicultura (Tabla 2). En general, el incremento de temperatura sobre la temperatura ambiente deberá de ser cuanto más alto mejor, sobre todo en invierno, cuando las temperaturas ambientales son más bajas. Esto se debe a que, en principio, cuanto mayor sea la temperatura, mayor será la velocidad de crecimiento de los animales cultivados, siempre que todas las demás variables se conserven óptimas. Cuanto más constante sea la temperatura, será más predecible el comportamiento de los animales y por lo tanto será más fácil su cultivo en dichas condiciones. Las instalaciones deberán estar cerca de la Central, ya que el incremento de temperatura baja rápidamente si hay que llevar los efluentes a varios km del lugar de evacuación. Por lo tanto, al seleccionar una Central con posibilidades de utilización en acuicultura, habrá que considerar si hay espacio disponible a su alrededor y cómo se puede aprovechar al máximo. Es ésta una restricción importante que, en general, hace que los cultivos a establecer cerca de una central deban de ser altamente intensivos, es decir densidades de animales por volumen de agua, lo que es técnicamente más difícil de conseguir. Para evitar tanto las paradas de flujo resultantes de averías o mantenimiento normal de las centrales como el uso intermitente de anticorrosivos y antibiocidas, es conveniente, aunque no absolutamente necesario, el que tenga

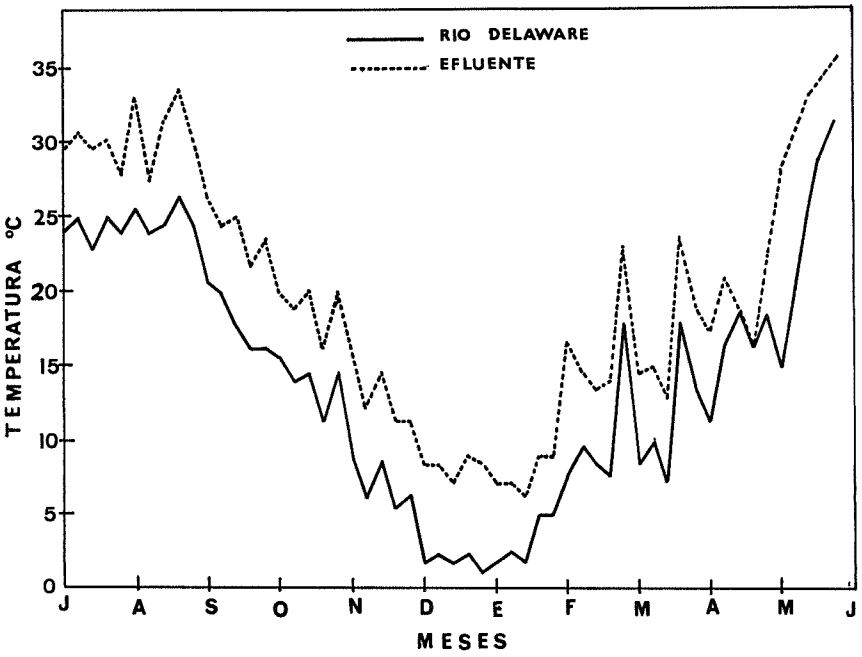

Fig. 4. Perfil de temperaturas a lo largo del año del río y de los efluentes termales de refrigeración.
Este perfil u otros similares debe de obtenerse con prioridad a cualquier proyecto de desarrollo para el aprovechamiento de los efluentes termales de una central eléctrica. En acuicultura, permite seleccionar a priori, utilizando los datos de la literatura, las especies que pueden ser económicamente cultivadas y durante qué períodos del año. Después, la experimentación "in situ" irá definiendo con mayor exactitud las especies idóneas.

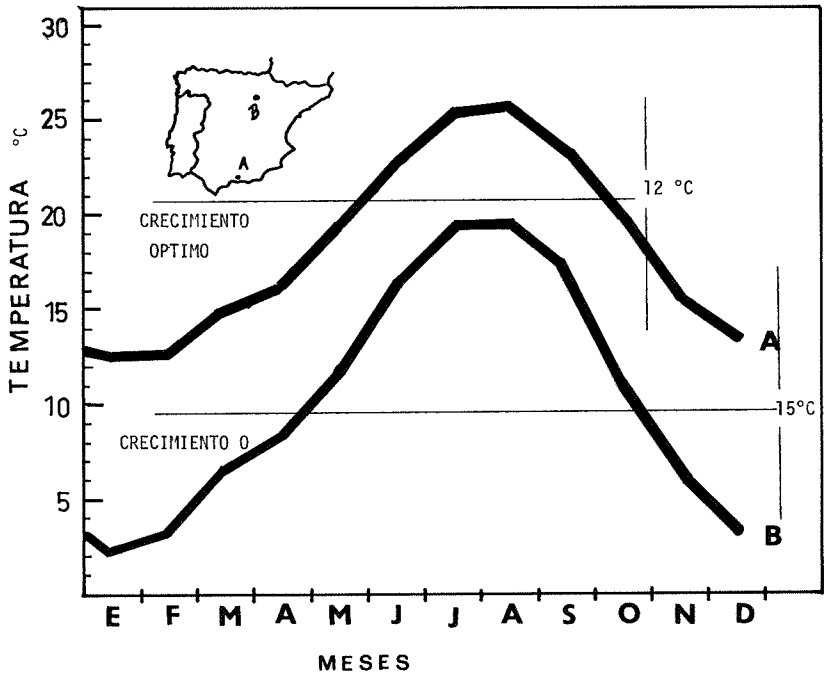

Fig. 5. Variaciones extremas de temperatura en España. (Estos datos se refieren a temperatura del aire no del agua).
Estas curvas tienen dos características en relación con la Acuicultura: la máxima diferencia entre la temperatura mínima y máxima, lo que afecta a la selección de la especie y el número de meses que se mantiene una temperatura óptima, lo que afecta la velocidad de crecimiento por año. En el gráfico ser han señalado los niveles de crecimiento óptimo y de crecimiento 0 (media de 15 especies indígenas en España). Para cada especie y variedad habrá que estudiar estos gráficos correspondientes al agua, así como el incremento de temperatura sobre estas curvas que supone el emplear efluentes termales. Los datos son las temperaturas medias anuales desde 1931 hasta 1960 según el Instituto Nacional de Meteorología. La capital más fría fue Soria, con una media total de 10,4°C (B) y la más caliente Málaga con una media total de 18,5°C (A).

la central varios grupos, ya que las paradas de flujo que resultan de los conceptos arriba mencionados suelen no ser simultáneas en estos casos. La calidad de aguas es otro criterio primario de selección para la acuicultura. Habrá que estudiar tanto la toma de agua como la posible alteración que ésta sufra al pasar por los tubos del condensador. En calidad de aguas se incluyen variables tales como: PH, concentraciones de sales, dureza, sólidos disueltos, concentraciones de gases (oxígeno, nitrógeno, supersaturación, etc.), metales pesados, etc. En todo caso, habrá que disponer de otras fuentes complementarias tanto de agua dulce como de agua salada, ya que se necesitarán, al menos, para limpieza, control de temperatura y desinfección. Por último, un caso especialmente favorable para el aprovechamiento del calor residual de los efluentes lo constituyen las centrales con pantanos de disipación asociados, ya que no precisan de construcción de estanques y ofrecen un espacio disponible bastante considerable (2,3,4,7,9).

Tabla 2

Criterios primarios de selección de la Central Térmica para la Acuicultura

- $\Delta T_{grande} = T_{efluente} - T_{ambiente}$ máx.
- Variaciones de temperatura pequeñas = $T_{máx} - T_{mín}$ mínimo.
- Espacio disponible alrededor de la Central.
- Varios grupos para minimizar paradas.
- Buena calidad de aguas.
- Proximidad al efluente.
- Fuente de agua normal (agua de mar y agua dulce).
- Pantanos asociados.

Aquí se enumeran algunos de los criterios para seleccionar la Central que más se adapte al aprovechamiento por Acuicultura. Esta selección es una primera aproximación. La selección final deberá hacerse teniendo en cuenta los resultados de un estudio teórico y después práctico de viabilidad técnico-económica.

Tabla 3

Efecto biológico de los efluentes

Concepto	*Efecto biológico*	*Ventaja*
Temperatura	↑ Velocidad de crecimiento	+
– Aumento de tempera.	↑ Nutrición	– +
– Variaciones bruscas	↑ Enfermedades biológicas	–
	↑ Enfermedad de las burbujas	–
Flujo	↑ Calidad de aguas	+
– Paradas	↓ Calidad de aguas	–
– Métodos antifouling	↑ Toxicidad	–

Los efectos biológicos del aumento de temperatura se traducen principalmente en un aumento de la velocidad de crecimiento que se puede llegar a mantener en invierno. En la naturaleza la velociad de crecimiento en invierno es muy baja. Esto plantea problemas en la alimentación que deberá ser la adecuada. El flujo de agua tiende a mantener una buena calidad de ésta, a pesar de grandes concentraciones de animales, concepto necesario para la viabilidad económica del cultivo. Problemas importantes pueden aparecer con el uso de estos efluentes: aumento de las enfermedades y toxicidad de metales y métodos antifouling principalmente. El primer problema necesitaría la asistencia de un centro especializado de patología, el segundo de métodos de ingeniería de recirculación de agua.

3. Características de las especies biológicas

Las especies biológicas animales que se pueden cultivar utilizando efluentes vienen restringidas por dos tipos de conceptos: El efecto biológico de los efluentes (3) y las especies cuya tecnología de cultivo se conoce suficientemente (4).

Los efectos biológicos de los efluentes pueden clasificarse en efectos debidos a la temperatura y al flujo (Tabla 3). El aumento de temperatura aumenta la velocidad de crecimiento y en esto se basa, fundamentalmente, la lógica de la utilización de los efluentes de refrigeración; ahora bien, el aumento de temperatura tiene otros efectos biológicos tales como un aumento y variación del tipo de nutrición y un posible aumento del stress como consecuencia de variaciones bruscas, lo que, a su vez, se puede convertir en un detonador de enfermedades. El flujo tiene la ventaja de que, al ser elevado, permite, en principio, utilizar técnicas de cultivo intensivo sin las cuales sería impensable un aprovechamiento de los efluentes. A su vez, puede tener desventajas en cuanto a paradas periódicas y toxicidades debidas a métodos anticorrosivos y antibiocidas (13,14). Todos estos condicionamientos y problemas son ejemplos del tipo de control que es necesario mantener para atacar seriamente un proyecto de Acuicultura usando efluentes termales. Las soluciones existen en la tecnología actual, pero se hace necesario tener estas dificultades en mente, a la hora del diseño.

Los efectos biológicos de las variaciones de temperatura son complejos por ser interdependientes con otras numerosas variables. La magnitud de estas variaciones afecta, de menor a mayor, la reproducción, crecimiento y supervivencia (Fig. 6). En algunas especies, la reproducción tiene lugar a temperaturas por encima y en otras por debajo de las temperaturas óptimas de crecimiento, si bien la temperatura de reproducción es la que exhibe el margen más estrecho de variación La temperatura de supervivencia o temperaturas letales, se definen en función de tiempos de exposición a esa temperatura y en función de tiempos de aclimatación a esa temperatura y en función de tiempos de aclimatación (temperatura anterior a la que han sido expuestos) ya que todos los animales acuáticos de importancia comercial: moluscos, crustáceos y peces, son animales de sangre fría. Las relaciones entre temperatura y actividad son curvas tales como la de la Fig. 7A. Brevemente, el aumento de temperatura produce un aumento de la actividad. A menudo, por encima de una cierta temperatura, un pequeño incremento provoca la muerte del animal (temperatura letal T_2). La disminución de temperatura provoca una disminución de la actividad fisiológica apta para el transporte y la manipulación. Por debajo de una cierta temperatura, el animal muere (temperatura letal T_1). Estas temperaturas letales T_1 y T_2 dependen del tiempo de exposición. A temperaturas extremas, el tiempo de exposición necesario para que sean letales es menor. Las temperaturas letales T_1 y T_2 dependen también de la temperatura de aclimatación. Estas relaciones permiten obtener una zona de tolerancia definida por una temperatura límite (T_1) en la que se produce la muerte en todas las condiciones (Figura 7B).

El aumento de la actividad fisiológica y metabólica lleva aparejado un aumento del consumo de oxígeno y un aumento de las necesidades nutritivas.

El tema de oxígeno es crítico, dado que el aumento de temperatura produce simultáneamente una disminución de la solubilidad de los gases en agua, oxígeno incluido (figura 8) y un aumento de su demanda en los seres vivos. Esto hace que deban tomarse precauciones especiales para asegurar concentraciones de oxígeno cerca de la saturación en cada momento. Además, los aumentos bruscos de la temperatura de la "sangre" en los animales de "sangre" fría (moluscos, crustáceos, peces) lleva a una disminución de la solubilidad de los gases disueltos en ella (nitrógeno y oxígeno fundamentalmente) provocando la enfermedad de las burbujas, que puede causar muertes masivas en un corto intervalo de tiempo. Por todo ello se hace necesario el equilibrar el contenido de gases de los efluentes en todo momento, bien por aireación (cascadas, paletas, etc.), bien por oxigenación, bien por ambos métodos. Las variables temperatura-contenido de gases han de ser vigiladas estrechamente para evitar muertes masivas y/o stress continuo a los animales.

En cuanto al aumento de las necesidades nutritivas, la variación no es solo en cantidad sino también en calidad. Ambos factores han de controlarse estrechamente para asegurar una conversión del alimento en producto que sea máxima. La figura 9 expone varias curvas de crecimiento obtenidas en distintas cantidades de alimento a distintas temperaturas en forma general. El índice de la conversión del alimento se obtiene según la fórmula: Indice de conversión = crecimiento/cantidad de alimento. Calculando los índices de conversión a distintas temperaturas y a distintas cantidades de alimento se pueden definir las zonas con índices de conversión óptimos. Estas zonas de temperatura y cantidad de alimento que dan un índice de conversión óptima son muy pequeñas y habrán de determinarse para cada especie.

Fig. 6. Esquema de los rangos relativos de temperatura óptima para la supervivencia, el crecimiento y la reproducción.
La magnitud de esta variación va de menor a mayor en el orden de reproducción crecimiento y supervivencia. Las temperaturas óptimas de crecimiento y reproducción suelen coincidir muy poco. En algunas especies, la reproducción se produce a temperaturas óptimas de crecimiento, si bien la temperatura de reproducción es la que exhibe el margen más estrecho. La temperatura de supervivencia, temperaturas letales, se definen en función de tiempos de exposición a esa temperatura y en función de tiempos de aclimatación (temperatura anterior a la que han sido expuestos) para animales de sangre fría.

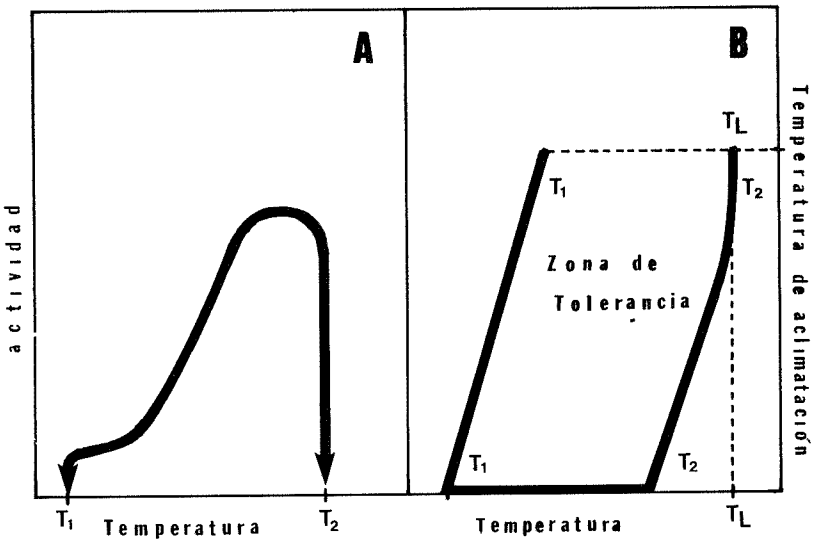

Fig. 7. Relaciones entre temperatura y actividad (A) y temperaturas letales y aclimatación (B) para animales de sangre fría.
Según aumenta la temperatura, se produce un aumento de la actividad hasta un plateau. Un i ncremento de temperatura mayor provoca la muerte del animal (temperatura letal T_2). La disminución de temperatura provoca una disminución de la actividad fisiológica apta para el transporte y la manipulación. Por debajo de una cierta temperatura, el animal muere (temperatura letal T_1). Estas temperaturas letales T_1 y T_2 dependen del tiempo de exposición. A temperaturas extremas, el tiempo de exposición necesario para que sean letales es menor. Las temperaturas letales T_1 y T_2 dependen también de la temperatura de aclimatación (B), relaciones que permiten definir una zona de tolerancia definida por una temperatura límite, en la que se produce la muerte en todas las condiciones.

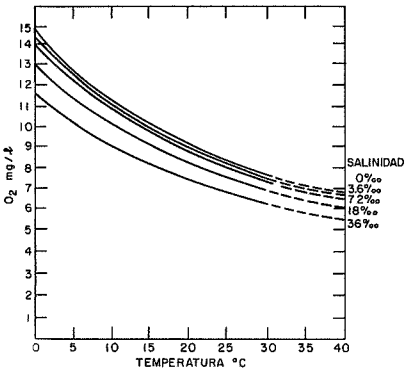

Fig. 8. Variación de la solubilidad del oxígeno en agua con la temperatura y la salinidad.
La cantidad de oxígeno disuelto en el agua disminuye con el aumento de temperatura. Esto hace que deban tomarse precauciones especiales para asegurar concentraciones cerca de la saturación en cada momento, cuando la temperatura se eleva.

Por último, la selección de las especies biológicas deberá hacerse teniendo en cuenta la lista de especies cuya tecnología de cultivo más se conoce (4), dado lo complejo de poner a punto una técnica de cultivo para una especie nueva. Teniendo en cuenta que hemos restringido esta discusión a especies animales y dentro de ellas a especies importantes comercialmente desde el punto de vista del consumo humano, las especies más representativas se han expuesto en la figura 10. Están más o menos ordenadas por preferencia de temperaturas: temperaturas letales (mínima y máxima), temperatura óptima de crecimiento y rango de temperaturas de crecimiento. Los valores y límites de cada una de estas temperaturas no son definidos y varían grandemente con las variables de calidad de agua, y con distintas razas o variedades de la misma especie además de otros factores como tiempo, temperatura de aclimatación, etc. Las especies cultivables para consumo humano pertenecen a tres grupos biológicos: moluscos, crustáceos y peces. Entre los moluscos bivalvos se encuentran los grupos de ostras, almejas y mejillones; entre los crustáceos se encuentran el langostino y la langosta; entre los peces se encuentran los representantes más estudiados de: peces carnívoros de agua fría (salmón atlántico y pacífico), peces carnívoros de aguas templadas (lubina americana y europea), peces hervíboros (mujol), peces bentónicos (diversos grupos de peces planos) y otras especies (anguila, dorada, pez limón, salmón blanco, palometa, tilapia y trucha). La decisión sobre la(s) especie(s) a cultivar depende no solo de criterios biológicos, sino también de criterios locales, de mercado, económicos, de personal, etc.

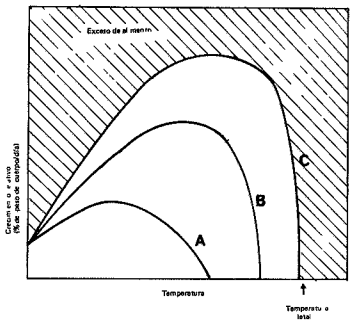

Fig. 9. Curvas de crecimiento en función de la temperatura con diferentes cantidades de alimento.
A, B y C representan las curvas obtenidas con cantidades crecientes de alimento. Las cantidades de alimento varían, generalmente, entre el 1 y el 8 por 100 del peso del cuerpo/día. El crecimiento relativo varía, generalmente, entre el 0,2 y 2 por 100 del peso del cuerpo/día. El índice de la conversión del alimento se obtiene según la fórmula: Indice de conversión = crecimiento/cantidad de alimento. Calculando los índices de conversión a distintas temperaturas y a distintas cantidades de alimento se pueden definir las zonas con índices de conversión óptimos.

Ejemplo de instalaciones: Planta piloto en Mercer

Este proyecto se abordó en colaboración entre la empresa eléctrica "Public Service Electric and Gas Company", las Universidades "Trenton State College" y "Rutgers University" y la empresa de acuicultura "Long Island Oyster Farms". Más tarde se obtuvieron ayudas del "National Science Foundation" y "Research Applied to National Needs Program". El proyecto se empezó en 1973 y el informe final se entregó en 1977 (17, 18, 19 y 20).

Las instalaciones constituyen una planta piloto en la "Mercer Generating Station" a orillas del rio Delaware en el estado de New Yersey, en Estados Unidos. El propósito de esta planta piloto es el estudiar la triple viabilidad: biológica, de ingeniería y económica del aprovechamiento del agua de refrigeración de las centrales eléctricas para el cultivo de Machrobrachium (langostino tropical de agua dulce) y de trucha. El agua de refrigeración de ésta Central, es expulsada al ambiente con un incremento de unos 6°C sobre la temperatura del agua del río (figura 4), aproximadamente se vierten unos 2 millones de litros por minuto.

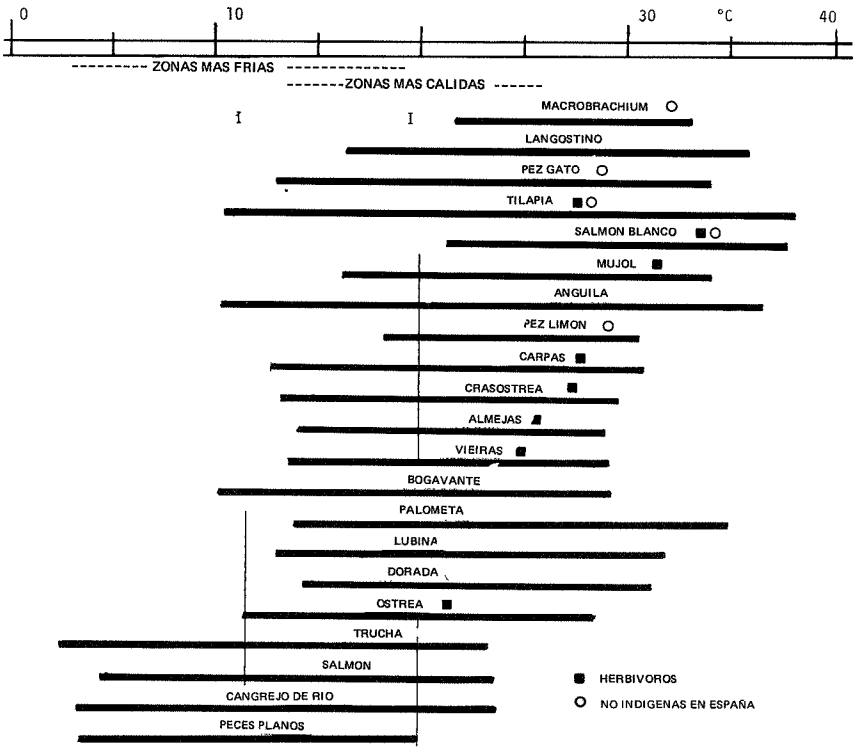

Fig. 10. Rangos de temperaturas de supervivencia y óptimas de las especies importantes en acuicultura.
La dependencia de la biología de las especies con la temperatura puede definirse por los siguientes criterios: temperaturas letales (mínima y máxima), temperatura óptima de crecimiento, rango de temperaturas de crecimiento, temperatura óptima de conversión del alimento, temperatura de reproducción y temperaturas óptimas de desarrollo, principalmente. Los valores y límites de cada una de estas temperaturas no son definidos y varían grandemente con otros factores de calidad del agua, y con distintas razas o variedades de la misma especie además de otros factores como tiempo, temperatura de aclimatación, etc.

La instalaciones estan situadas junto a la salida del agua de refrigeración o efluente termal de la Central eléctrica. Constan de un estanque de atemperamiento (que se utiliza como reserva y recirculación en los periodos de cloración) una serie de estanques de engorde y de alevinaje, un invernadero experimental, dos laboratorios y un estanque para aguas de desecho además de las instalaciones eléctricas (transformador) y otras dependencias y servicios (figura 11). De todo el caudal del efluente se utiliza aproximadamente menos de un 1 por 100 para el funcionamiento de la planta piloto (12.000 l/min de un total de 1,7 x 10^6 l/min). Este agua se bombea al estanque de atemperamiento, donde se puede mezclar con agua del río en caso de que se necesite disminuir la temperatura del agua. Desde este estanque se distribuye a los estanques de experimentación (figura 11). El agua atraviesa longitudinalmente los estanques y se recoge en tuberías que la conducen al estanque de desecho y de allí el efluente y despues al río. Cuando la Central incorpora cloro en el agua de refrigeración como biocida unas 3 h/día, el estanque de atemperamiento mantiene un flujo de unos 6.000 l/min, durante unas dos horas (suficiente para cada ciclo de cloración). El caso de algún fallo en el sistema, el agua puede recircularse en vez de ser eliminada al estanque de desecho. La cámara de recirculación está diseñada de tal manera que puede mantenerse funcionando por gravedad de 30 a 60 minutos si hay corte de electricidad.

Además de con Machrobrachium se han hecho experimentoscon trucha (90 g a 190 g en 3 meses), anguilas (3 g a 200 g en 1 año), pez gato (30 g a 450 g en unos 6 meses) y lubina (en experimentación). Estas pruebas tratan de conseguir los siguientes datos:

— Determinar para cada especie los requerimientos termales, de oxígeno disuelto y de tolerancia a cloro disuelto.

— Determinar los requerimientos nutricionales y/o las eficiencias de conversión de piensos comerciales para cada una de las especies y temperaturas.

— Optimizar el orden de cultivo de las diferentes especies y de los diferentes estados de desarrollo de cada una de las especies de forma que el proceso pueda ser viable económicamente a escala comercial.

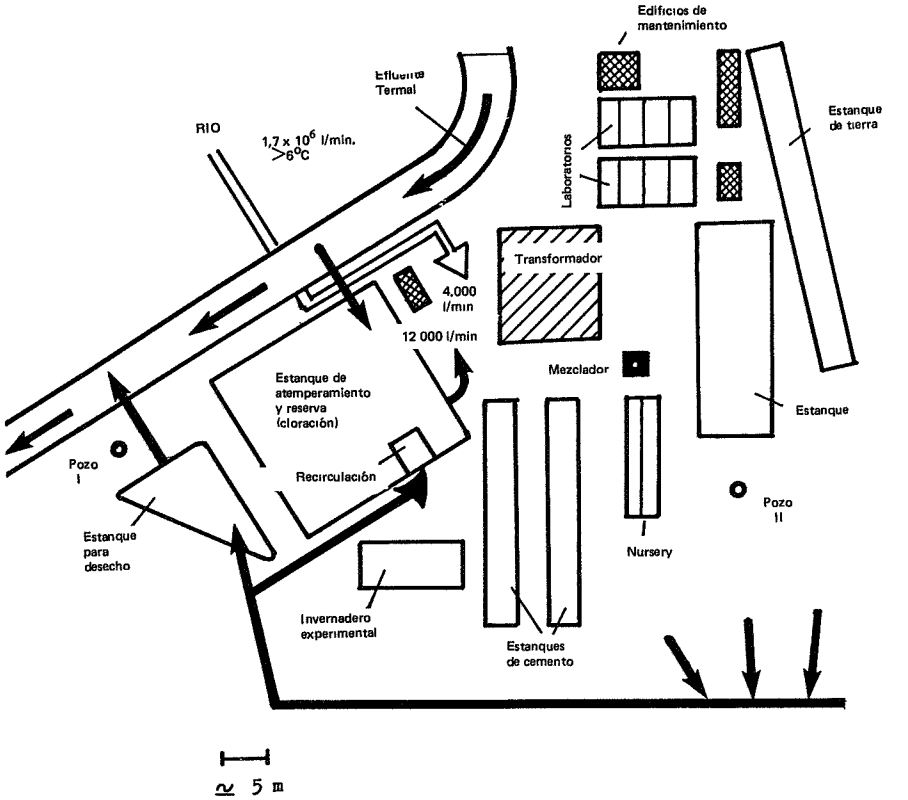

Fig. 11. Esquema de planta-piloto para experimentos de aprovechamiento de efluentes termales en acuicultura.

Esta planta piloto está instalada en Mercer a orillas del río Delaware, New Jersey, Estados Unidos. Las variaciones de temperatura ambiental en la superficie del agua del río van desde 6°C a 30°C. El efluente adiciona aproximadamente entre 6° y 15°C al efluente. La planta trabaja con doble cosecha de trucha y macrobrachium. Las instalaciones tienen agua procedente del efluente termal (12.000 l/min) y del río (4.000 l/min) principalmente.

El uso de los efluentes permite elevar la temperatura del agua, para así mantener temperaturas de mayor crecimiento incluso en invierno. Ahora bien, para una misma especie, el perfil de temperatura (figura 4) presenta determinados valores que lo hacen demasiado caliente en verano o bien no suficientemente caliente en invierno. Para resolver este problema se han diseñado esquemas de doble cosecha (figura 2) a base de una especie de aguas frías y otra de aguas calientes (21). La especie de agua fría se cultiva durante el verano en efluentes naturales y en el efluente termal en invierno. La especie de agua caliente se cultiva durante los meses calurosos en los efluentes termales. Dependiendo de la especie, los tamaños de partida se eligen de forma que al final de cada periodo se obtenga un producto comercializable. Este diseño se ha conseguido en la Central de Mercer. Después de los estudios económicos preliminares basados en los datos obtenidos, principalmente debido a las bajas densidades de cultivo del machrobrachium, se estimó que la contribución a las ventas de esta especie no podría ser mayor del 15 por 100, por lo que actualmente se están buscando otras especies de agua caliente para sustituirla (19). La especie que tiene más posibilidades es el pez gato que además de tener temperaturas de crecimiento de hasta 35°C, puede soportar temperaturas muy bajas, mientras que el machrobrachium muere a los 15°C. Otras especies que están siendo ensayadas son la anguila y la lubina, ambas de aguas templadas. La investigación del machrobrachium se centra ahora en el cultivo en cámaras individuales, única manera de aumentar su densidad por unidad de volumen aunque se piensa que éste método no es económico (18).

Las principales conclusiones de éste estudio práctico de viabilidad fueron (17):

— El cultivo de Machrobrachium y de trucha utilizando efluentes termales de centrales eléctricas es viable biológicamente. El crecimiento, la eficiencia de conversión del alimento y los porcentajes de mortalidad fueron similares a los que se encuentran en métodos tradicionales.

— La selección de especies para cultivo en efluentes termales ha de hacerse cuidadosamente, buscando que los requerimientos de temperatura de las especies se ajusten lo más posible a las variaciones de temperatura del efluente. Si el perfil de temperaturas del efluente (figura 2) excede los límites de temperatura de una especie dada, se debe considerar la posibilidad de usar el sistema de doble cosecha, utilizando una especie de aguas calientes para el verano (por ejemplo, machrobrachium) y una especie de aguas frías para el invierno (por ejemplo, la trucha).

— Para evitar que las paradas de una estación generadora de electricidad se traduzcan en paradas del flujo de agua, se deben elegir solo aquellas centrales que cuentan con 2 ó 3 grupos, ya que de ésta forma las paradas no son simultáneas y se puede mantener un efluente constante.

— Especialmente las truchas son sensibles a las trazas de cloro disuelto en las aguas del efluente durante los periodos en que el condensador se limpia con éste biocida. El problema se evitó cerrando la toma del efluente y utilizando un sistema de recirculación del agua y aireación durante estos periodos. Para controlar la temperatura del agua se dispuso de tomas del agua del río que se podían mezclar con el efluente. Se utilizaron alarmas automáticas para avisar valores fuera de los límites de la temperatura del agua, oxígeno disuelto y presión del agua durante la noche y los fines de semana.

— La viabilidad económica de una planta comercial basada en los resultados de ésta planta piloto, está entre el 9-25 por 100 de recuperación anual de la inversión inicial. Aumentando la profundidad de los estanques de 1 a 2,4 m la recuperación pasa a ser del 22-25 por 100, ya que se aumenta la densidad de peces por unidad de área mientras que ello genera otros gastos debidos a un mayor flujo de agua y a una aireación suplementaria. Con las técnicas empleadas durante este estudio, el 77-95 por 100 de las ventas se obtienen de la trucha y solo el resto del Machrobrachium, por lo que se está experimentando con otras especies de agua caliente como alternativas (pez gato, anguilas y lubinas, principalmente).

— La calidad del machrobrachium y de la trucha engordados en el efluente termal fueron comparables a los comerciales. Los análisis de metales

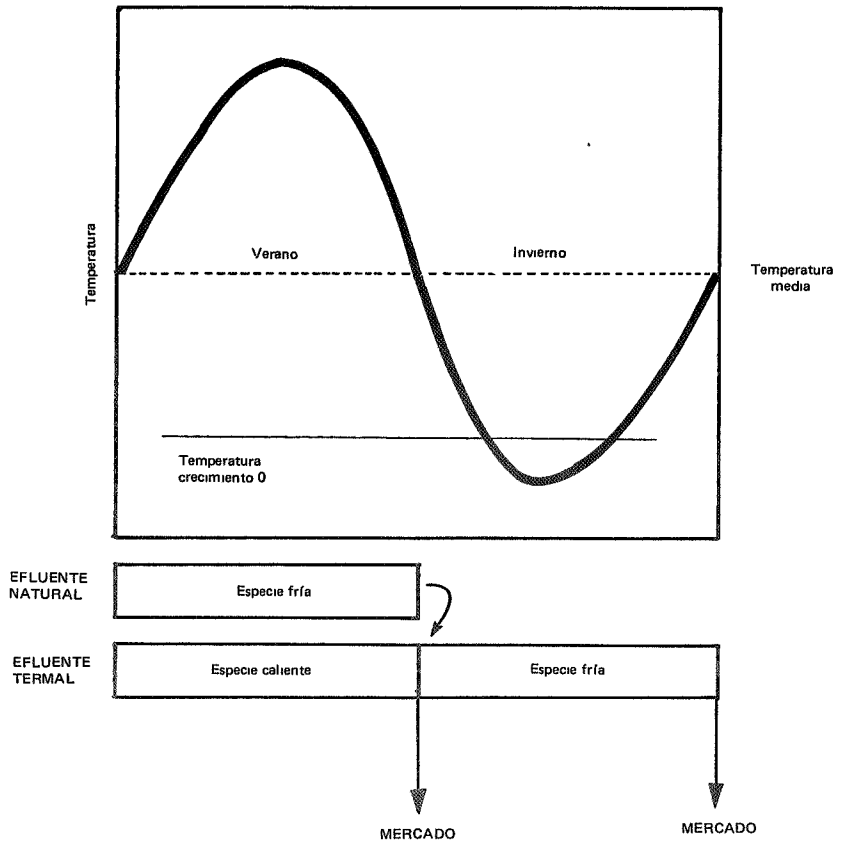

Fig. 12. Doble cosecha.
El uso de efluentes termales permite mantener temperaturas de crecimiento en invierno. Sin embargo para una misma especie el incremento de temperatura del efluente suele ser fatal en el verano. Para resolver este problema se han estudiado esquemas llamados de doble cosecha a base de una especie de aguas frías y otra de aguas calientes. La especie de agua fría se cultiva durante el verano en efluentes naturales y durante el invierno en efluentes termales, al final de 1 año se llega a un producto comercializable. La especie de aguas calientes se cultiva durante medio año en los efluentes termales, al final de cuyo período se puede comercializar.

Tabla 4
Niveles de algunos metales pesados en la carne de Macrobrachium en ppm

	Comercial		*Mercer*
	1	*2*	
Ag	0,0650	0,1430	0,0800
Au	0,0005	0,0006	0,0008
Cu	3,0000	4,9500	12,1000
Zn	12,1000	12,8000	11,7000
Fe	10,0000	6,8800	7,3200
Pb	1,2500	0,8800	0,8300
Cd	0,1350	0,0610	0,1640
Mn	1,9500	2,3700	1,0200
Ni	3,9800	0,3850	0,9750
Cr	2,1000	0,9680	1,3500
As	0,0010	0,0010	0,0002

Los niveles de algunos metales pesados se analizaron en ejemplares comerciales (Bangladesh e Indonesia) así como en los ejemplares criados en Mercer. El nivel de mercurio sólo se midió, en el caparazón de los ejemplares procedentes de Mercer siendo de 0,0001 ppm.

pesados arsénico e insecticidas no moitraron niveles mayores de lo normal (Tabla 4).

Bibliografía

(1) *"Anuario de energía"* 1977 pág. 29. Editorial Ingeniería Química, S.A.

(2) *"Abstracts"* 11th annual meeting World Mariculture Society. Aquaculture, New Orleans 80, March 5-9, 1980, 85 pág.

(3) *"Efluentes Termales y Acuicultura (I)".* Selección bibliográfica: "Nuevas posibilidades de la Acuicultura. Aprovechamiento de efluentes termales de centrales eléctricas", Instituto Tecnológico para Postgraduados. Madrid, España, 1980, Mayo 19-21, 165 pág.

(4) *"State of the Art".* Waste heat utilization for agriculture and aquaculture. Electric Power Research Institute (EPRI), 1978, 133 pág.

(5) *"Acuicultura en los efluentes termales e información sobre Congresos de Acuicultura"* en 1980 (New Orleans y Stavanger). (III) Selección bibliográfica "Nuevas posibilidades de la Acuicultura. Aprovechamiento de efluentes termales de Centrales Eléctricas". Instituto Tecnológico para Postgraduados, Madrid, España 1980, Mayo 19-21, 153 pág.

(6) Coll, J.M. *Informe sobre la hatchery de Morone Saxatilis en Monk's Corner y Denis Wildlife Center* (Carolina del Sur), 1978, 17 pág. Madrid, España, Mayo 19-21.

(7) Kildow, J.T. *"Economic and political aspects of using thermal effluent for aquaculture"* (M.I.T.) Madrid, España, Mayo 19-21, 41 pág.

(8) Pariser, E.R. *"Aquaculture".* An overview with special emphasis upon the use of waste heat (M.I.T.) Madrid, España. Mayo 19-21, 41 pág.

(9) *Report of the Symposium on new developments in the utilization of heated effluents and of recirculation systemi for intensive aquaculture.* EIFAC/FAO/80/9. June 1980, 13 pág. Stavenger, Norway 28-30 May 1980.

(10) *Report of Current Research in the electric utility industry (aquaculture).* EPRI Electric Power research Institute 12.01 B. 1979, 13 pag.

(11) Peterson, R.E. y K.K. Seo *"Thermal Aquaculture".* Proc. 8th annual meeting WMS. January 9-13, 1977 San José, Costa Rica.

(12) Neilson, B.J. *"Exploting Natural Oyster Populations Through Waste Heat Utilization".* S.S. Lee, and S. Sengupta (eds.) Proceedings Waste Heat Management and Utilization Conference, Miami Beach, Florida, May 9-11, 1976.

(13) Dorband, W.R. *Effect of Chemicals in Thermal Effuent on Homarus americanus Maintained in Aquaculture Systems.* Masters Thesis, San Diego State University (1975).

(14) Kildow, J., and J.E. Huguenin *"Problems and Potentials of Recycling Wastes for Aquaculture",* Massachussetts Institute of Tehnology Sea Grant Report MITSG-74-27. 1974.

(15) Picardi, A.C. *The Economic Feasibility of Oyster Culture in New England Using Heated Effluents from Power Plants.* Progress Report N° 1. Massachusetts Institute of Thecnology, 1973.

(16) Johns, R.E., R.J. Folwell, R.T. Dailey and M.E. Wirth. *"An Economic Analysis of Scheduled Aquacultural Uses of Warm Water in the Pacific Northwest Resulting from Power Generation",* Journal Environmental Quality, vol. 2, N° 2 (1973) p. 224.

(17) Eble, A.F. *Integration of Thermal and Food Processing Residuals into a System for Commercial Culture of Freshwater Shrimp* (power Plant Waste Heat Utilization in Aquaculture). Final Report Vol. II. Newark: Public Service Electric and Gas Company, 1976, p. 166.

(18) Eble, A.F., N.E. Stalpe, M.C. Evans, and N.F. De Blois. *"The Use of Thermal Effluent of an Electric Generating Station in New Jersey in the Culture of the Tropical Prawn, Macrobrachium rosenbergii and the Rainbow Trout, Salmo gairdneri"* Power Plant Waste Heat Utilization in Aquaculture Workshop I, Trenton, New Yersey, (1975), p. 47.

(19) Farmanfarmian, A. *Integration of Thermal and Food Procesing Residuals into a System for Commercial Culture of Freshwater Shrimp* (Power Plant Waste Heat Utilization in Aquaculture). Final Report Vol. III Newark Public Service Electric and Gas Company, 1976, p. 129.

(20) Farmanfarmian, A., R. Moore, and K. Volosin. *"Diseasonal Thermal Aquaculture Physiological and Enviromental Factors Influencing the Survival, Growth and Polluction of Giant Shrimp and Rainbow Trout",* Power Plant Waste Utilization in Aquaculture - Workshop I, Trento New Yersey, November 6-7 (1975), p. 213.

(21) Guerra, C.R., B.L. Godfriaux, and C.J. Sheanun. *"Utilization of Waste Heat from Power Plants by Sequential Culture of Warm and Cold Weather Species".* S.S. Lee and S. Sengupta (eds.) Proceedings Waste Heat Management and Utilization Conference, Miami Beach, Florida, May 9-11, 1976.

Don **Julio Coll Morales** es profesor en el Instituto Tecnológico para Postgraduados de Madrid. Nacido en dicha capital, estudió Ciencias Biológicas en la Universidad Complutense de Madrid, donde trabajó en bioquímica y metabolismo de los fosfolípidos durante varios años, obteniendo el doctorado en 1974. Después pasó al Departamento de Biología del Instituto de Tecnología de Massachusetts (M.I.T.) donde se doctoró en 1978 dentro de la especialidad de biología celular, investigando sobre el cultivo de las células rojas de la sangre. Actualmente, y dentro del tema general de Acuicultura, sus investigaciones incluyen el aislamiento y cultivo de microalgas para alimentación de larvas de animales acuáticos y la reproducción y cria larvaria del cangrejo de río.