ITEA (2004), Vol. **100A N.° 2,** 89-106

INFLUENCIA DEL MERCADO LIBERALIZADO DE LA ENERGÍA ELÉCTRICA SOBRE INSTALACIONES DE ACUICULTURA INTENSIVA ASOCIADAS A EFLUENTES DE REFRIGERACIÓN

J.C. Gutiérrez-Estrada*,[1], E. De Pedro-Sanz, R. López-Luque***, I. Pulido-Calvo***

* Dept. Ciencias Agroforestales, Univ. Huelva, EPS, Campus Universitario de La Rábida, 21819 Palos de la Frontera (Huelva), Spain
e-mail: juanc@uhu.es y ipulido@uhu.es

** Dept. Producción Animal, Univ. Córdoba, ETSIAM, Avda. Menéndez Pidal s/n, 14080 Córdoba, Spain
e-mail: emiliano.depedro@uco.es

*** Dept. Física Aplicada, Univ. Córdoba, ETSIAM, Avda. Menéndez Pidal s/n, 14080 Córdoba, Spain
e-mail: fallolur@uco.es

RESUMEN

En este trabajo se analiza el efecto que la liberalización del mercado eléctrico tiene sobre la variación de los regímenes de temperatura del agua en plantas de acuicultura intensiva que aprovechan los efluentes de refrigeración de centrales generadoras de electricidad. Para ello se han utilizado datos de una instalación dedicada al engorde de anguilas europeas, la cual toma el agua caliente del efluente de refrigeración de la Central Térmica de Puente Nuevo (Córdoba). Los resultados indican que la liberalización del mercado del sector eléctrico tiene una influencia significativa sobre la forma y cantidad de energía generada por la Central Térmica, y por consiguiente sobre el régimen termal del efluente de refrigeración. Los niveles de temperatura en el interior de la instalación son dependientes asimismo de la temperatura del agua en el efluente de refrigeración, estimándose la disminución de los índices de crecimiento debidos a este factor en un 5%.

Palabras clave: *Anguilla anguilla*, Sector eléctrico, Central térmica, Estrés termal.

SUMMARY

INFLUENCE OF THE ELECTRIC ENERGY NON-REGULATED MARKET IN THE INTENSIVE AQUACULTURE PLANTS ASSOCIATED TO COOLING EFFLUENTS

In this paper, the effect of the electric energy non-regulated market in the water thermal regimes variation of intensive fishfarms that use the heated water for cooling of power plants is analysed. This way, data of aneel intensive rearing system was used. In this fishfarm the heated water is drawn from the cooling effluent of the Puente Nuevo power plant (Córdoba). The results show that the non-regulated market has a significant

1. Autor al que debe dirigirse la correspondencia.

effect on the form and amount of generated energy and the thermal regime of the cooling effluent. The temperature levels in the fishfarm depend of the water temperature of cooling effluent, being estimated the decrease of the growth index in 5%.

Key words: *Anguilla anguilla*, Electric sector, Power plant, Thermal stress.

Introducción

En España el mercado de productos frescos relacionados con el pescado ha sido tradicionalmente alto, con un consumo per capita de 32,8 kg/año frente a los 14,4 kg/año de media a nivel mundial. La disminución de la pesca tradicional como consecuencia de restricciones impuestas alrededor de las costas y en los caladeros, ha facilitado el desarrollo de la acuicultura, incrementándose de forma significativa la demanda de los productos procedentes de piscifactorías (312.647 toneladas en 2001) (COBO *et al.*, 1999; FAO, 2000; COLL, 2001).

La mayor parte de la producción se concentra en cinco especies: la trucha arco iris (*Oncorhynchus mykiss*), la dorada (*Sparus aurata*), el rodaballo (*Psetta maxima*), el atún rojo (*Thunnus thynnus*) y la lubina (*Dicentrarchus labrax*). Otras especies como la anguila europea (*Anguilla anguilla*) o tilapias (*Tilapia sp*) se están criando con unos niveles de producción más moderados a pesar de la calidad de los productos finales. Técnicamente esto parece estar determinado por el régimen de explotación y por la dependencia de estos cultivos del mantenimiento de la temperatura del agua entre 20 y 26 °C durante largos períodos de tiempo.

El factor temperatura es particularmente importante para este tipo de explotaciones intensivas, ya que su rentabilidad depende en gran parte del tiempo transcurrido entre el inicio del cultivo y la recogida de los lotes de cosecha. De este modo si la temperatura del agua se mantiene alrededor del óptimo fisiológico, se facilita la obtención de tasas de crecimiento que permiten extraer lotes de peces de tamaño comercial en un tiempo mínimo. Sin embargo, el mantenimiento de la temperatura del agua dentro del rango óptimo fisiológico a lo largo de un ciclo de cosecha, supone un importante gasto en energía eléctrica o al menos implica localizar la instalación junto a una fuente de agua caliente. En este sentido, autores como NASH y PAULSEN (1981), COLL (1991) o VEIL (1998) indican el gran potencial de los efluentes de refrigeración de las centrales generadoras de energía eléctrica.

En España existen un total de 48 centrales de generación, de las cuales en pocos casos (Centrales Térmicas de Puente Nuevo –Córdoba–; Litoral –Almería–; Alcudia –Mallorca–; San Roque –Cádiz–) se aprovecha o se ha aprovechado el efluente de agua caliente para fines comerciales o experimentales, lo que pone de manifiesto el crecimiento potencial de este tipo de explotaciones. Sin embargo, desde la entrada en vigor de la nueva Ley del Sector Eléctrico Español (Ley 54/1997) por la que se reconoce el derecho a la libre instalación y se organiza su funcionamiento bajo el principio de libre competencia, es necesario tener en cuenta, además de la posibilidad de aprovechamiento de esta fuente de agua caliente, el sistema de producción eléctrica de la central de generación. En este nuevo mercado los productores de energía eléctrica deben efectuar sus ofertas económicas de venta de energía a través de

un operador de mercado, el cual determinará el orden de entrada en funcionamiento de las unidades de producción (centrales térmicas, nucleares, etc.) partiendo de la oferta más barata hasta igualar la demanda de energía en ese período de programación (BOE núm. 285 de 28/11/1997). De esta forma aquellas centrales que produzcan una energía más barata generarán electricidad de forma más continuada y, por tanto, se asociarán a un flujo de agua caliente constante con pocas variaciones en su régimen de temperaturas.

El propósito de este trabajo ha sido analizar el efecto de la entrada en vigor de la liberalización del mercado de la energía eléctrica sobre el parámetro temperatura en una explotación intensiva de anguilas asociada a una Central Térmica y las posibles consecuencias del cambio de los regímenes de variación de este factor sobre el crecimiento potencial de la población. De este modo, los resultados obtenidos podrían formar parte de un modelo de gestión de la propia planta y de futuras instalaciones con características de producción semejantes.

Material y métodos

Área de estudio

El estudio se ha llevado a cabo en Hidrorecursos S.A. Esta piscifactoría se localiza en la mitad norte de la provincia de Córdoba y centra toda su producción en el engorde de anguilas europeas. Situada en la margen izquierda del embalse de Puente Nuevo, toma el agua necesaria para su producción de dos fuentes principales: a) el embalse de Puente Nuevo (agua fría) y, b) el canal de refrigeración de la Central Térmica de Puente Nuevo (agua caliente) (figura 1).

El flujo de agua en el interior de la instalación es de tipo mixto, es decir, parte de los tanques de cultivo están incluidos dentro de un sistema flujo abierto mientras que otros se encuentran dentro en un sistema de recirculación. En el sistema abierto hay 2 series de 12 tanques circulares de 3,2 m^3 (series C y D), correspondientes a la zona de alevinaje y una serie de 14 tanques rectangulares de 110 m^3 (serie G) que se corresponde con la zona de engorde. Por otra parte, en el sistema con recirculación se encuentran 2 series de 12 tanques circulares de 3,2 m^3 (series A y B), que pertenecen a la zona de alevinaje y 20 tanques rectangulares de 16 m^3 (series E y F) de la zona de preengorde. El proceso de recirculación es posible gracias a la acción de tres unidades de filtración (biofiltros). Dos de ellas están asociadas a las series A y B, respectivamente, mientras que la tercera filtra el agua procedente de las dos series de preengorde (figura 1).

La piscifactoría mantiene en sus instalaciones un alto grado de automatización ya que el proceso de filtración biológica se lleva a cabo bajo condiciones físico-químicas con pequeños rangos de variación. Esto obliga a tener bajo un control continuo variables como la concentración de oxígeno disuelto (mg/l), temperatura (°C) o pH. Para comprobar los valores de estos parámetros existen repartidas, tanto por los tanques de cultivo como en los propios filtros, sondas que permiten hacer una medición automática. Las mediciones son recogidas en tiempo real por un ordenador central donde se almacenan y se establecen las medidas de emergencia.

Fuente y análisis de los datos

Los datos necesarios para el análisis han sido obtenidos de dos fuentes principales: a) el ordenador central de la piscifactoría y,

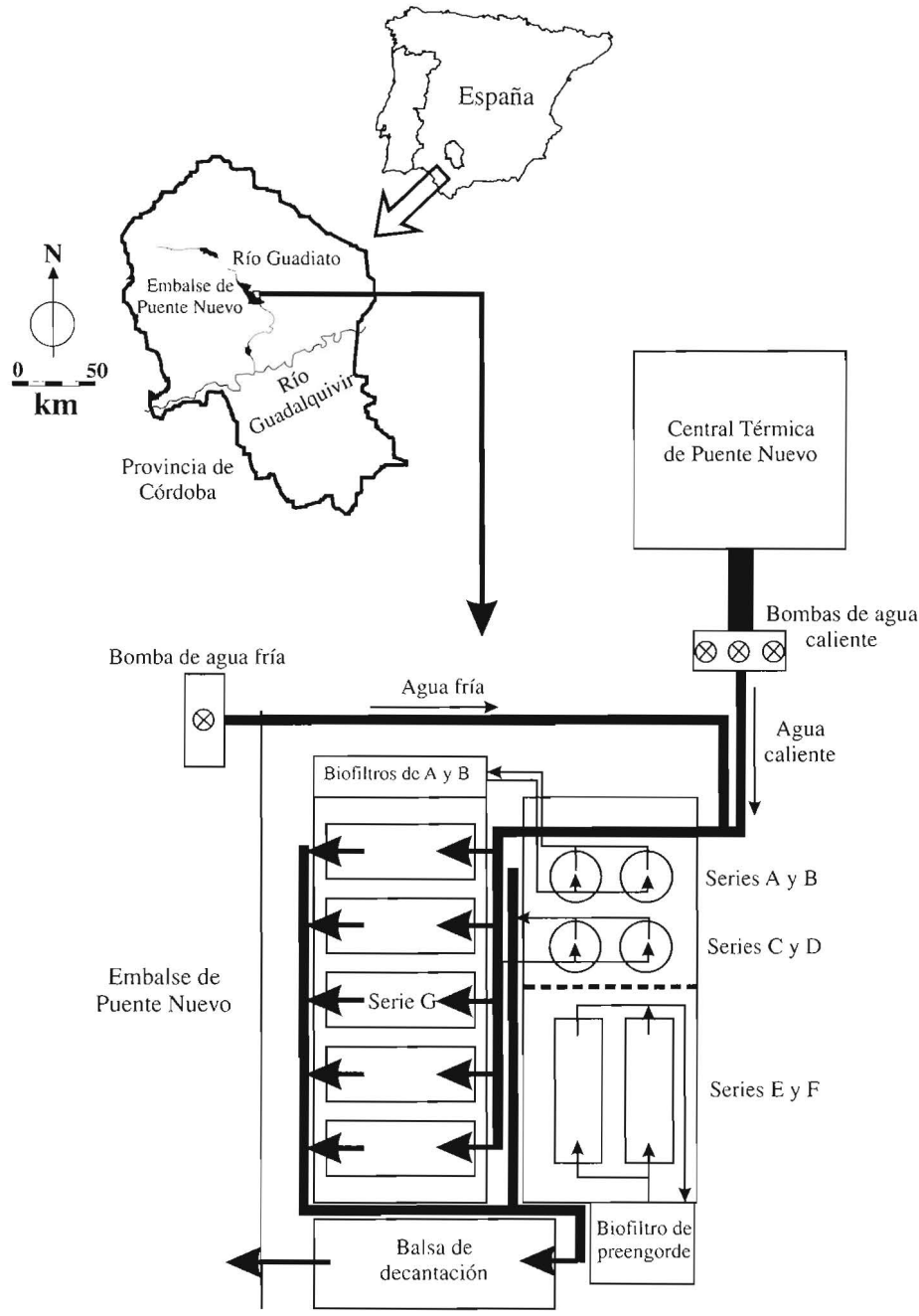


Figura 1. Localización de Hidrorecursos S.A. Esquema del flujo de agua en el interior de la instalación.

Figure 1. Geographical location of Hidrorecursos S.A. Schematic representation of the water flow in the fishfarm.

b) la Central Térmica de Puente Nuevo. De la primera se ha extraído básicamente las series de temperatura del agua en los tanques de cultivo (enero de 1997 a julio de 2000) mientras que la segunda ha proporcionado las series de datos de producción bruta generada por la central (enero de 1997 a julio de 2000).

Para extraer los componentes periódicos de las series de datos procedentes de la Central Térmica de Puente Nuevo se ha empleado una técnica conocida como Transformada de Fourier Rápida o FFT. Esta transformación para series de tiempo discreto se define como:

$$F(k) = \sum_{n=0}^{N-1} f(t) \cdot e^{(-jv_k t)} \qquad (1)$$

donde f(t) es serie temporal discreta, F(k) la transformada de Fourier de f(t), v es la frecuencia y N es el número de datos (OTNES y ENOCHSON, 1978; PARK, 1998). Al tratarse de series de tiempo discretas se ha establecido la frecuencia de barrido entre 0 y 0,5 para evitar de esta forma efectos de rebote de frecuencias (*aliasing*) (BLOOMFIELD, 1976). La FFT proporciona un par de valores para cada frecuencia de onda (coeficientes de Fourier), que se consideran como un número complejo con un componente cosenoidal (parte real) y otro senoidal (parte imaginaria). Ambos valores pueden combinarse para el cálculo del periodograma (2) (PARK, 1998).

$$\text{Periodo gra ma} = (\text{Parte real } F(k))^2 \cdot$$

$$\cdot (\text{Parte imaginaria } F(k))^2 \cdot \frac{N}{2} \qquad (2)$$

Dado que el crecimiento de cualquier especie piscícola depende de forma considerable de la temperatura (T), es interesante evaluar el efecto de la variación de este parámetro sobre el crecimiento. Según BROWN (2000) el rango de crecimiento de la anguila se encuentra entre 12,9 y 29,9 °C. Otros autores como MÁS-ÁLVAREZ y BARRERA-OROZCO (1989) incrementan el límite inferior hasta 15 °C. Por otra parte, DEGANI *et al.* (1988) entre otros establecen la temperatura óptima de crecimiento entre 24 y 26 °C. A partir de estos datos podemos obtener un índice de crecimiento debido a la temperatura (ICT) mediante la asignación del valor 1 cuando la temperatura es de 24,5 °C, y 0 cuando la temperatura es inferior a 12,9 °C o superior a 29,9 °C. Así, el índice de crecimiento estará comprendido siempre entre 0 y 1, indicando el 0 unas condiciones para el crecimiento nulo, y el 1 unas condiciones de crecimiento óptimas. De forma teórica, la relación continua entre temperatura e índice de crecimiento se obtiene al forzar una regresión polinómica de tercer grado entre los tres puntos críticos, es decir, cuando ITC = 1 y T = 24,5 °C, ITC = 0 y T = 12,9 °C, y cuando ITC = 0 y T = 29,9 °C (GUTIÉRREZ-ESTRADA, 2003):

$$\text{Si } 12{,}9 \le T \le 29{,}9$$

$$ICT = 8{,}216683 - (1{,}491831 \cdot T) + (0{,}085719 \cdot T^2) - (0{,}001504 \cdot T^3)$$

$$\text{Si } T < 12{,}9 \text{ ó } T > 29{,}9$$

$$ICT = 0 \qquad (3)$$

Resultados

Análisis de la producción bruta de la central generadora

La variación temporal de la energía bruta generada por la Central Térmica de Puente Nuevo durante el período comprendido entre enero de 1997 y julio de 2000 se muestra en la figura 2. Se puede observar como la producción de energía durante el año 1997 fluc-

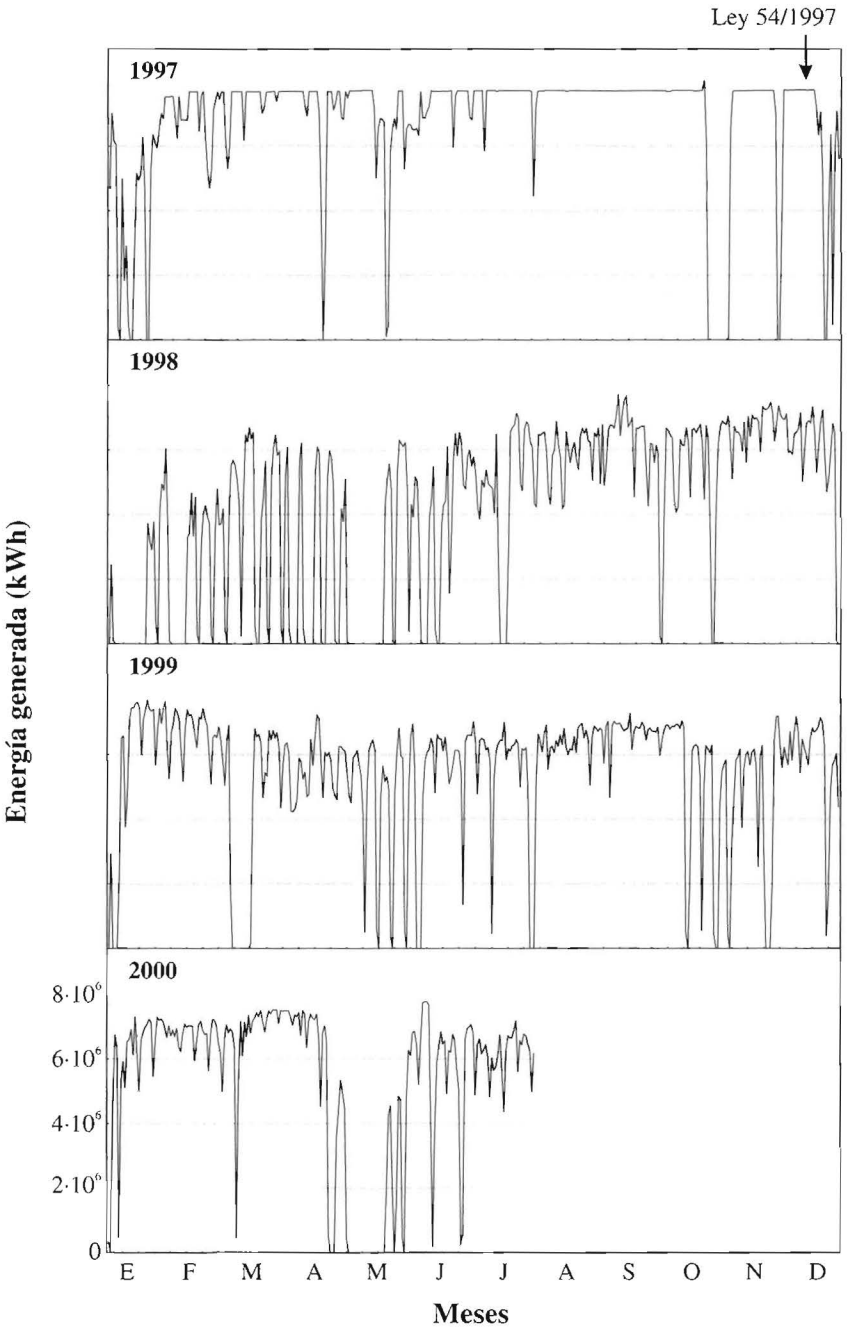


Figura 2. Energía generada (kWh) por la Central Térmica de Puente Nuevo en el período comprendido entre enero de 1997 y julio de 2000.

Figure 2. Generated energy (kWh) by the Puente Nuevo Power Plant between January of 1997 and July of 2000.

túa ligeramente en los primeros meses del año, aunque a partir de principios de febrero se estabiliza existiendo a partir de entonces tan solo tres paradas técnicas separadas por largos períodos en los que la energía producida se encuentra cercana a la máxima posible. Para este período la producción media se centra alrededor de $7,1 \cdot 10^6$ kWh. A partir de la entrada en vigor de la Ley 54/1997 del Sector Eléctrico (BOE 28-11-1997) a finales de noviembre de 1997, la producción de energía desciende considerablemente. En los primeros meses de 1998 la producción media se estabiliza alrededor de $2,1 \cdot 10^6$ kWh, produciéndose a partir de ese momento un incremento constante hasta alcanzar los valores máximos anuales. Durante el año 1999 se produce un ligero descenso desde los primeros meses del año (donde se encuentran los máximos anuales) hasta principios del mes de julio. A partir de ese momento la producción se mantiene alrededor de $5,6 \cdot 10^6$ kWh. Esta tendencia media se mantiene durante los ocho primeros meses del año 2000 ($5,4 \cdot 10^6$ kWh).

La transformada de Fourier de los datos muestra la presencia de coeficientes con valores absolutos significativamente alejados del valor cero, lo que indica la fuerte periodicidad de la producción. En el tiempo transcurrido desde enero hasta el 28 de noviembre de 1997, el ciclo de producción tiene un carácter mensual al encontrarse en el periodograma frecuencias con coeficientes significativos que se corresponden con períodos de 38, 30 y 51 días. Después de la entrada en vigor de la Ley 54/1997 la periodicidad de la producción es semanal, al detectarse frecuencias significativas que se corresponden con períodos de 7 y 3,5 días (figura 3).

Un análisis de la varianza llevado a cabo para cada uno de los sietes días de la semana ha mostrado la presencia de diferencias significativas en el nivel de producción después de la implantación de la Ley 54/1997 (ANOVA: $F=15,451$; $p_\alpha<0,001$) (figura 4). Un test de Tukey posterior mostró que los dos días en los que los niveles de producción disminuían significativamente eran el sábado y el domingo (Tukey: en todos los casos nivel de significación entre lunes-martes-miércoles-jueves-viernes, sábado y domingo respectivamente: $p_{\alpha\text{sábado}} < 0,05$; $p_{\alpha\text{domingo}} < 0,001$). No se encontraron diferencias significativas entre ambos días (Tukey: $p_{\alpha\text{sábado-domingo}} = 0,052$). Estas diferencias no fueron detectadas antes de la implantación de la Ley 54/1997 (ANOVA: $F = 0,606$; $p_\alpha = 0,999$) (figura 4). La comparación de los valores medios de producción por día de la semana antes y después de la Ley mostró en todos los casos diferencias significativas (cuadro 1). Por otra parte, un test χ^2 sobre el número de días a un determinado nivel de producción antes y después de la aplicación de la nueva Ley mostró la presencia de marcadas diferencias significativas ($\chi^2 = 1772,181$; g.l. = 7; $p_\alpha < 0,001$) (figura 5). Esto indica que la liberalización del mercado eléctrico no sólo ha influido en la forma y momento de distribución de la energía si no que también ha sido responsable de la disminución de la cantidad de energía generada en la Central Térmica de Puente Nuevo.

Análisis de la temperatura del agua en el interior de la instalación

La figura 6 muestra la evolución temporal de la temperatura en el interior de la planta. Se puede observar como durante los años 1997, 1998 y 1999 la temperatura oscila siguiendo un patrón general con valores inferiores durante los meses de otoño-invierno y superiores durante la primavera-verano

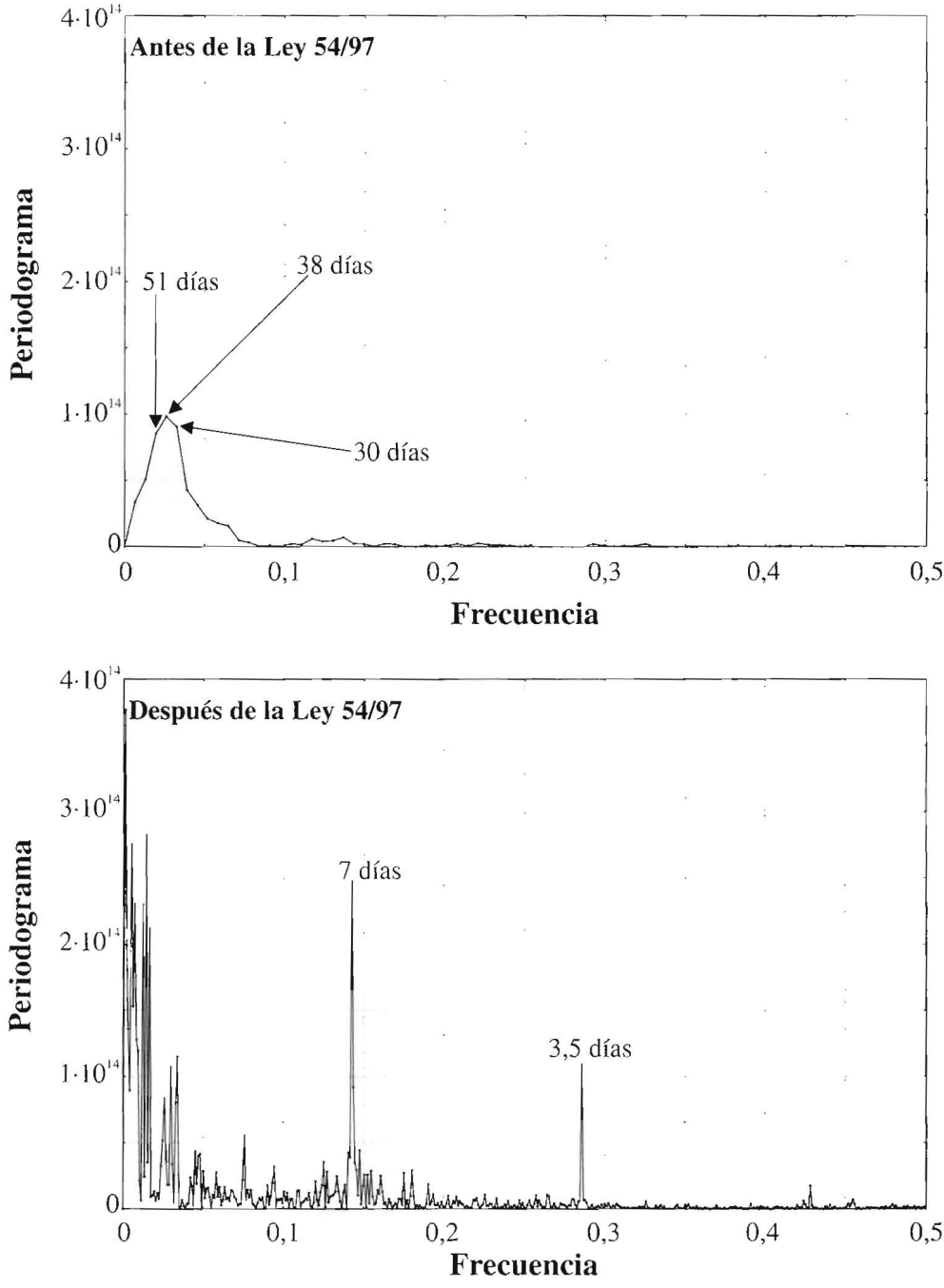


Figura 3. Periodogramas de los datos de energía generada antes y después de la aplicación de la Ley 54/1997.

Figure 3. Energy generated periodograms before and after of the 54/1997 law.

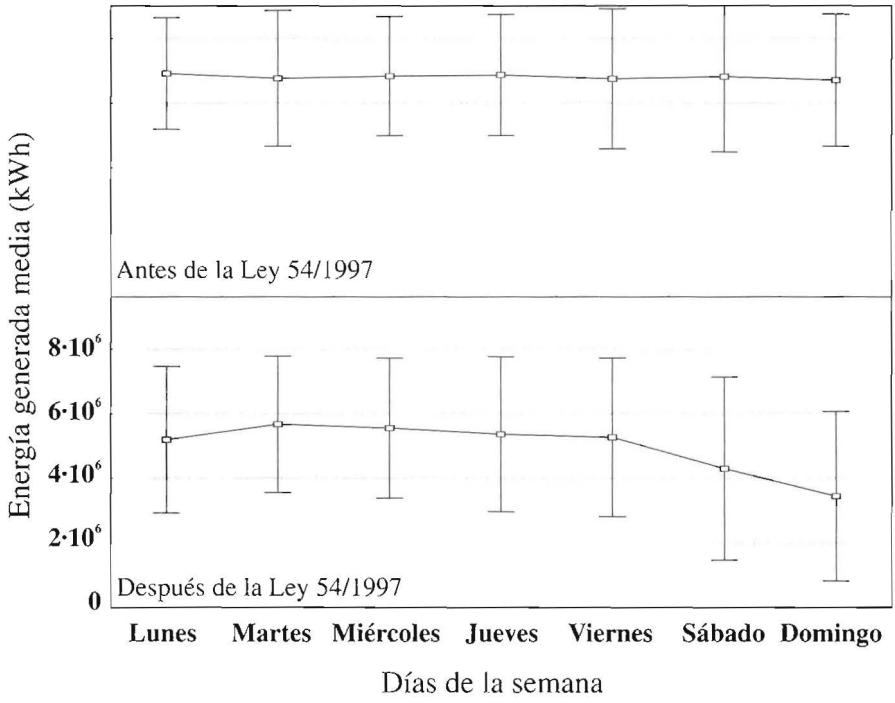


Figura 4. Energía generada media (kWh) por días de la semana antes y después de la liberalización del mercado eléctrico.

Figure 4. Average generated energy (kWh) per week days before and after of the electric non-regulated market.

Cuadro 1. Comparación de la producción media de la Central Térmica de Puente Nuevo por días de la semana antes y después del mercado libre. Se muestra el estadístico t de Student y el nivel de significación (p_α) del test para cada día

Table 1. Comparison of the average energy production of Puente Nuevo Power Plant per week days before and after of the electric non-regulated market. The t Student statistic and the significance level (p_α) for each day are shown

	Lunes	Martes	Miércoles	Jueves	Viernes	Sábado	Domingo
Producción bruta media ($\cdot 10^6$ kWh) antes de la Ley 54/1997	7,067	6,770	6,836	6,870	6,752	6,793	6,698
Producción bruta media ($\cdot 10^6$ kWh) después de la Ley 54/1997	5,154	5,671	5,550	5,366	5,268	4,319	3,468
Estadístico t	4,122	2,729	2,906	2,777	3,178	4,807	6,457
p_α	0*	0,002*	0*	0*	0*	0*	0*

(*) Diferencias significativas.

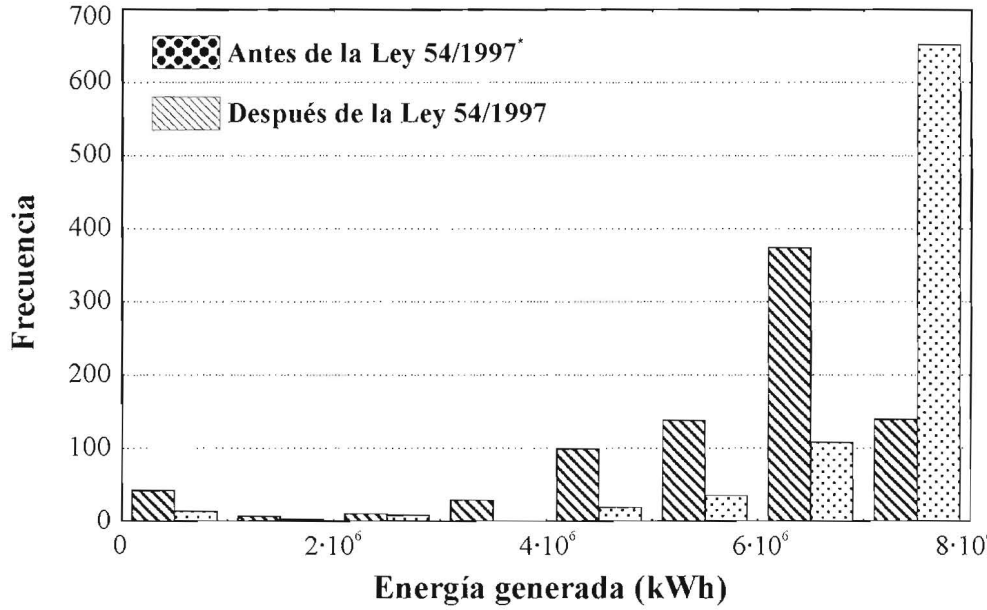


Figura 5. Distribución de frecuencias del número de días a distintos niveles de producción antes y después de la liberalización del mercado. *Datos escalados para permitir la comparación.

*Figure 5. Frequency distribution of the numbers of days to different production levels before and after of the electric non-regulated market. * Scaled data for comparison.*

(este patrón no es observable en el año 2000 con los datos disponibles). En el período de estudio, el mayor nivel de estabilidad es registrado en 1997 (etapa pre-ley), siendo las variaciones de temperatura mayores durante la etapa de implantación de la Ley.

La comparación de las temperaturas medias por días de la semana antes y después de la implantación de la Ley 54/1997 ha dado como resultado la ausencia total de diferencias significativas, indicando la no existencia de un patrón de variación de este parámetro a lo largo de los siete días de la semana (ANOVA antes de la Ley 54/1997: F = 0,195; p_α = 0,9778 – ANOVA después de la Ley 54/1997: F = 0,060; p_α = 0,9992). Sin embargo, cuando se compara la temperatura media global antes y después de la liberalización del mercado se observa la presencia de diferencias estadísticamente significativas (test de Mann-Whitney: Temperatura media antes de la Ley 54/1997 = 25,498 °C; Temperatura media después de la Ley 54/1997 = 24,341 °C; U = 49.999,0; $p_\alpha < 0{,}001$).

En la figura 7 se muestran los rangos de variación máximos y mínimos junto con las desviaciones típicas de las temperaturas para cada día de la semana. Se puede observar como antes de la entrada en vigor de la Ley 54/1997 la variación de temperatura se encontró entre 29 y 22,3 °C. Sin embargo, después de la aplicación de la Ley 54/1997 la temperatura osciló entre 29,7 y 17,2 °C. La comparación de las temperaturas medias por día de la semana antes y después de la Ley mostró en todos los casos diferencias significativas (cuadro 2). Por otra parte, la comparación de las varianzas para cada día de la semana antes y

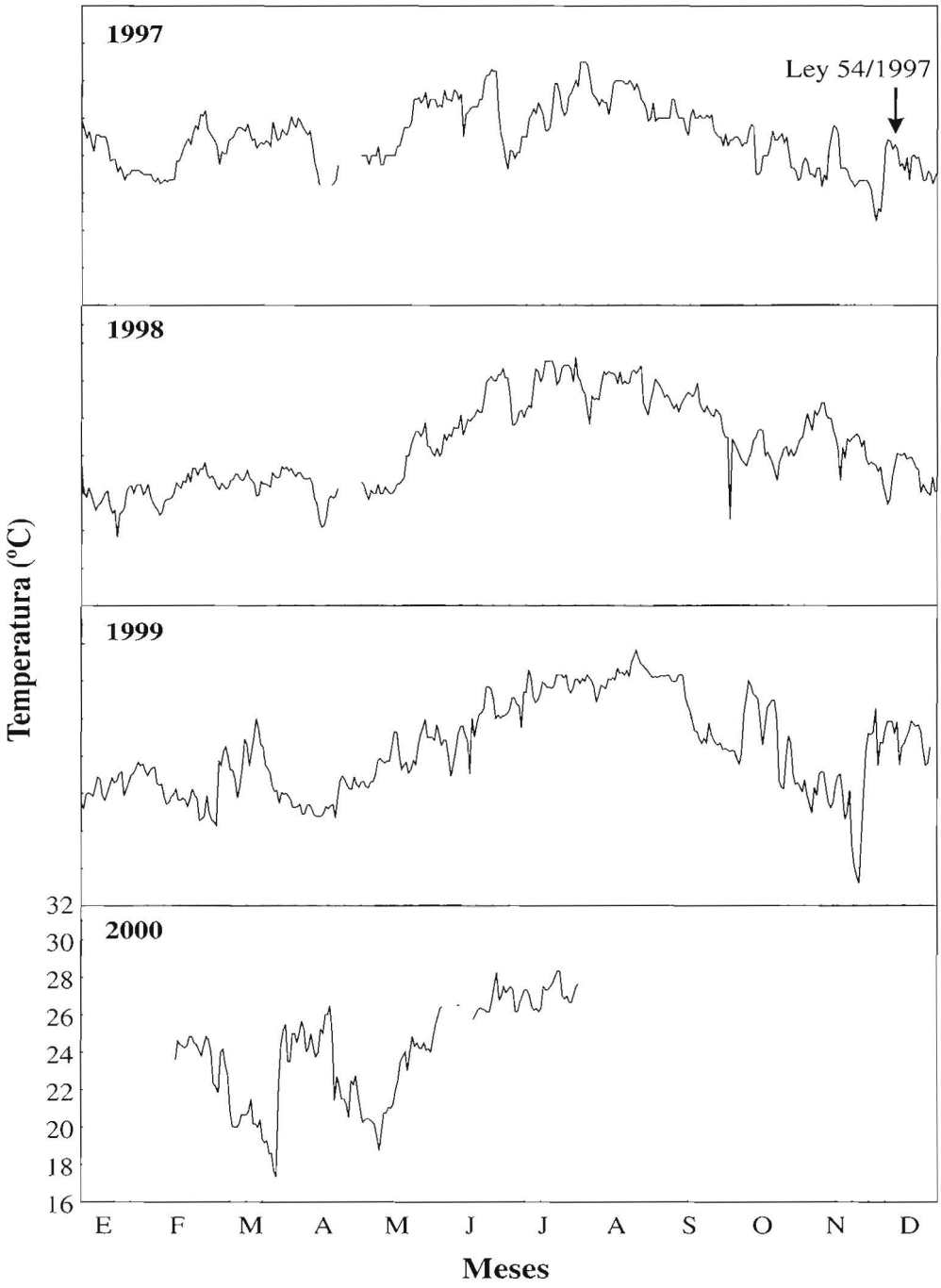


Figura 6. Evolución de la temperatura del agua en los tanques de cultivo en el período comprendido entre enero de 1997 y julio de 2000.

Figure 6. Water temperature evolution in the rearing tanks between January of 1997 and July of 2000.

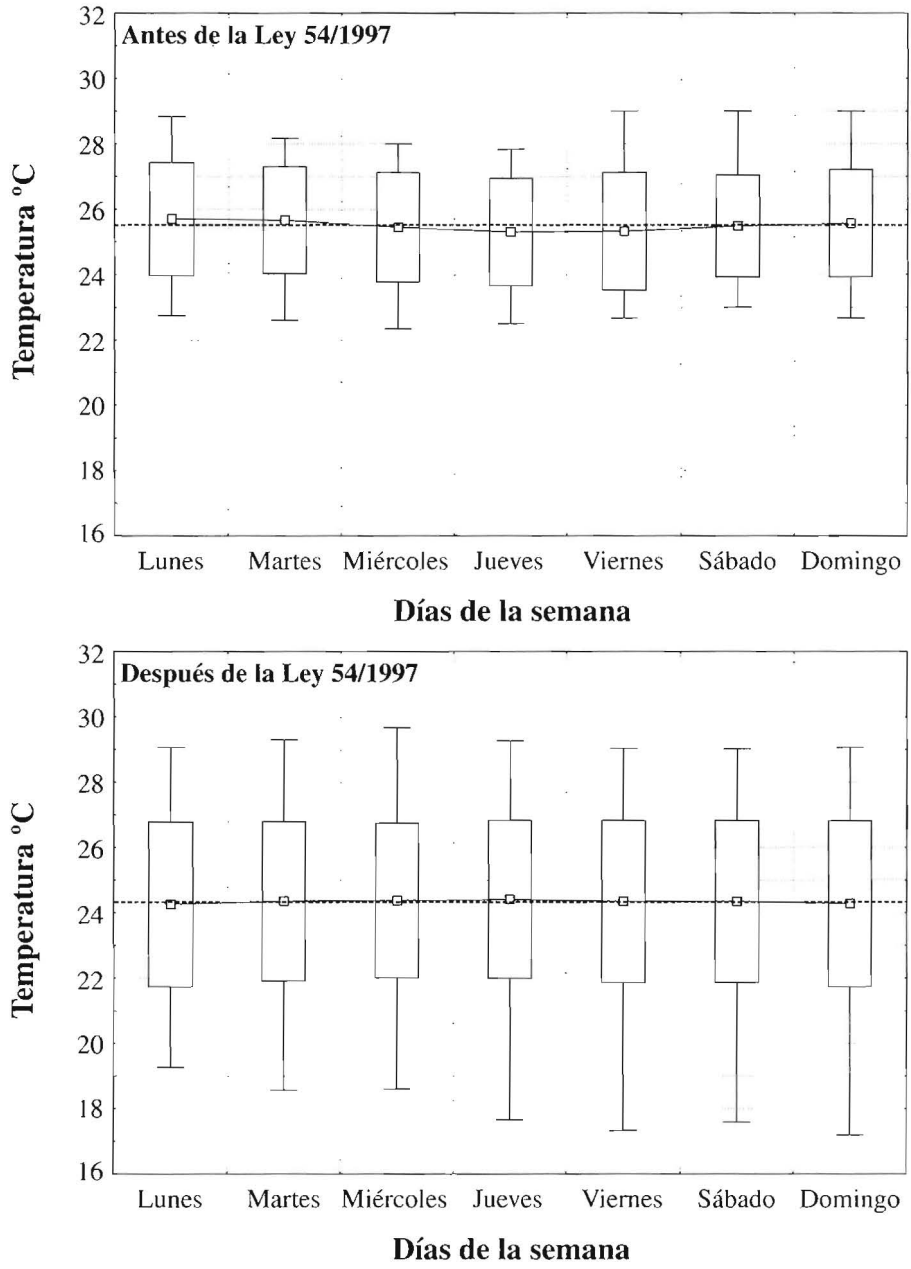


Figura 7. Temperaturas medias ± desviaciones típicas (cajas) del agua para cada día de la semana, con indicación de las temperaturas máximas y mínimas (barras) en el período considerado. La línea discontinua indica la temperatura media global antes y después de la liberalización del mercado.

Figure 7. Water average temperatures ± standard deviations (boxes) per week days. The maximum and minimum temperatures are showed (bars). The discontinuous line means the global average temperature before and after of the electric non-regulated market.

Cuadro 2. Comparación de la temperatura media del agua en los tanques de cultivo por días de la semana antes y después del mercado libre. Se muestra el estadístico t de Student y el nivel de significación (p_α) del test para cada día

Table 2. Comparison of the water average temperature in the rearing tanks per days before and after of the electric non-regulated market. The t Student statistic and the significance level (p_α) for each day are shown

	Lunes	Martes	Miércoles	Jueves	Viernes	Sábado	Domingo
Temperatura media del agua (°C) antes de la Ley 54/1997	25,3	25,3	25,2	25,1	25,0	25,1	25,2
Temperatura media del agua (°C) después de la Ley 54/1997	24,3	24,4	24,4	24,4	24,3	24,3	24,3
Estadístico t	2,577	2,432	2,036	1,653	1,799	2,072	2,300
p_α	0,01*	0,02*	0,03*	0,07	0,08	0,04*	0,03*

(*) Diferencias significativas.

después de la liberalización del mercado mediante un test de Levene indicó que el nivel de variación de las temperaturas después de la Ley fue significativamente mayor que en el año 1997 para todos los casos (cuadro 3). Asimismo, al calcular la diferencia existente entre las temperaturas de dos días consecutivos antes y después de la Ley, se pudo observar como la variación máxima durante el año 1997 se encontró en todo momento alrededor de 2 °C, mientras que en los años 1998 a 2000 esta variación fue de aproximadamente 5 °C. De esta forma, el polígono que contiene las diferencias de temperaturas entre dos días consecutivos correspondiente al período pre-Ley está incluido en su totalidad en el que contiene las diferencias de temperatura del período de libre mercado (figura 8).

Cuadro 3. Comparación de la variabilidad de la temperatura en el interior de la planta por días de la semana antes y después del mercado libre. Se muestra el estadístico de Levene y el nivel de significación (p_α) del test para cada día

Table 3. Comparison of the temperature variability in the fishfarm per week days before and after of the electric non-regulated market. The Levene statistic and the significance level (p_α) for each day are shown

	Lunes	Martes	Miércoles	Jueves	Viernes	Sábado	Domingo
Levene	5,984	5,835	4,663	4,578	4,182	9,223	6,901
p_α	0,016*	0,017*	0,033*	0,034*	0,043*	0,003*	0,010*

(*) Diferencias significativas.

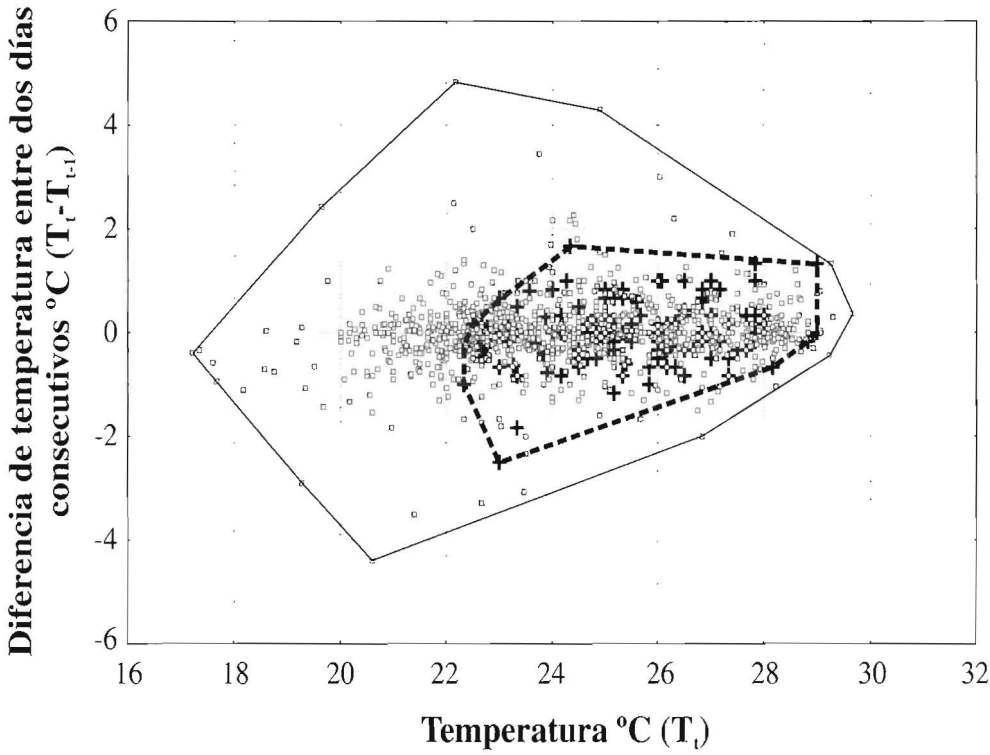


Figura 8. Temperatura del día t (T_t) frente a la diferencia de temperatura del día t menos el día t-1 (T_t-T_{t-1}). El polígono con línea discontinua recoge las diferencias de temperaturas entre dos días consecutivos antes de la aplicación de la Ley 54/1997. El polígono con línea continua recoge las diferencias de temperaturas entre dos días consecutivos en el mercado libre.

Figure 8. t Day temperature (T_t) versus the temperature difference of the t day minus t-1 day (T_t-T_{t-1}). The discontinuous line polygon contains the differences of temperatures between two consecutive days before the 54/1997 law. The continuous line polygon contains the differences of temperatures between two consecutive days after the electric non-regulated market.

La comparación de los índices de crecimiento medios debido a la temperatura indica la presencia de diferencias significativas, siendo el índice de crecimiento medio del período de generación a tarifa regulada aproximadamente un 5% mayor que durante el mercado liberalizado (test de Mann-Whitney: ICT medio antes de la Ley 54/1997: 0,90; ICT medio después de la Ley 54/1997: 0,85; $U = 58.165,0$; $p_\alpha < 0,001$).

Discusión

De la misma forma que en España, el suministro de energía eléctrica mediante tarifas no reguladas que obedecen a leyes de mercado está siendo implementado en algunos países de la Unión Europea como Suecia y Gran Bretaña (BANKS, 1994 y 1996). En cualquier caso e independientemente del tipo de mercado, la rentabilidad de la generación

está fuertemente influenciada, entre otras cosas, por la materia prima a partir de la cual se obtiene la energía, el rendimiento de los equipos, la potencia instalada y la localización estratégica de la central generadora. De esta forma, una central térmica de carbón con una potencia instalada media-baja producirá energía más cara que una central nuclear con una potencia instalada alta. En el mercado regulado, la baja rentabilidad de algunas centrales generadoras era compensada mediante una única cuenta de resultados dentro de las compañías suministradoras. Sin embargo, la separación impuesta por la Ley 54/1997 entre generación y comercialización con el objetivo de optimizar los costes de producción, hace que la entrada en funcionamiento de las centrales generadoras dependa casi exclusivamente de precio del kWh producido.

Estos nuevos condicionantes del mercado unido a las características de la central térmica de Puente Nuevo (generación a partir de carbón y una potencia instalada media-baja), implican una adaptación de la generación a patrones de demanda de energía con periodicidad típicamente semanal, en los que la bajada de demanda se produce durante el fin de semana. La interrupción o disminución significativa de la generación al final de la semana provoca el descenso o completo cese del flujo de agua caliente procedente de la central térmica, lo que puede suponer una aclimatación de los peces a una menor temperatura. Por otra parte, los arranques y paradas semanales de los grupos de generación someten a los tanques de cultivo a importantes variaciones de temperatura en muy poco tiempo, lo que favorece la aparición de factores estresantes.

En este sentido, el impacto de las centrales generadoras de electricidad sobre los regímenes termales de los ecosistemas acuáticos naturales y artificiales ha sido una preocupación durante las últimas décadas (MARIAZZI *et al.*, 1992; BARNTHOUSE, 2000; RICHKUS y MCLEAN, 2000). Esto es debido a que la temperatura del agua interviene de forma directa en multitud de procesos fisiológicos de los peces, teniendo por tanto una profunda influencia sobre distintos aspectos de la reproducción, crecimiento, etc. (BURNS, 1976; DOSORETZ y DEGANI, 1987; LUKSIENE y SANDSTRÖM, 1994; MAULE y SCHRECK, 1990; SODERBERG, 1990; ISRAELI-WEINSTEIN y KIMMEL, 1998).

La aparición de estrés en los sistemas intensivos está asociado a una gran variedad de condiciones ambientales, entre las que destacan los niveles altos de productos nitrogenados, la concentración de oxígeno disuelto, variaciones de temperatura o la acción conjunta de varios de estos parámetros (SYLVESTER, 1972; GUTIÉRREZ-ESTRADA, 2003). ENGELSMA *et al.* (2003) indican que la mayoría de los efectos de estrés en peces son atribuidos a la descarga de hormonas como consecuencia de la activación del eje interrenal-pituitaria-hipotálamo. La secreción de estas hormonas altera la composición de la sangre y los tejidos, aumentando la frecuencia de ventilación y de latidos del corazón e induciéndose una reducción en la efectividad del sistema inmune (MAZEAUD *et al.*, 1977; PALACKOVA *et al.*, 1990). Se incrementa por tanto la susceptibilidad a enfermedades y al ataque de parásitos, disminuyendo la tasa de crecimiento y favoreciéndose los focos de mortalidad, lo que a medio-largo plazo puede provocar una disminución del bienestar y salud de los animales.

Los efectos del estrés térmico sobre aspectos de la biología de peces en ambientes naturales han sido bastante estudiados (LUKSIENE y SANDSTRÖM, 1994). Sin embargo, los estudios que relacionan el estrés térmico con los niveles de crecimiento y productividad en instalaciones intensivas de producción en medio acuático son en la actua-

lidad prácticamente desconocidos (ENGELSMA *et al.*, 2003). A nivel de laboratorio, las relaciones entre la oscilación de la temperatura, los procesos de aclimatación, acumulación de estrés térmico y crecimiento, han sido bastante analizados aunque los resultados de estos estudios no han sido totalmente concluyentes (OTTO, 1974; HOKANSON *et al.*, 1977; COX y COUNTANT, 1981; KONSTANTINOV y ZDANOVICH, 1987; HEALT *et al.*, 1993; BENNETT y BEITINGER, 1997). Esto puede ser debido a que la temperatura a la cual se inicia el estrés es dependiente además del nivel de tolerancia de la especie del historial de exposición o aclimatación. Así, un típico ambiente de aclimatación permite al pez ser más tolerante a altas temperaturas en verano que en invierno. Por otra parte, un aspecto desconocido a tener en cuenta es la recuperación del estrés cuando la exposición a temperaturas subletales es eliminada. En este sentido la temperatura a la cual ocurre, la tasa de recuperación y el tiempo necesario para la recuperación total son desconocidos (BEVELHIMER y BENNETT, 2000).

La utilización de modelos para la estimación del crecimiento en peces se está convirtiendo en la actualidad en una potente herramienta para los piscicultores. En la mayoría de los casos estos modelos están basados en conceptos bioenergéticos, determinándose el crecimiento en función de la cantidad de calorías ingeridas y los costes energéticos (p.e.: respiración, movimiento y excreción) (VAN WINKLE *et al.*, 1997). Muchas de las relaciones incluidas en los modelos bioenergéticos son sensibles a los cambios de temperatura, lo que los convierte en herramientas ideales para comparar diferencias en crecimiento entre distintos regímenes de temperatura. Sin embargo, su utilización requiere disponer de datos experimentales sobre la cantidad de alimento procesado, excreción o respiración. En ausencia de datos experimentales, el empleo de un modelo teórico en el que se relaciona directamente el factor temperatura con un índice de crecimiento, puede servir como un indicador del cambio en el sistema de producción de la central térmica y por tanto de la variación del flujo y temperatura del agua. En este sentido, el modelo propuesto es sensible a las variaciones de temperatura por encima y por debajo del óptimo de crecimiento.

Agradecimientos

La realización de este trabajo ha sido posible gracias a la financiación llevada a cabo por el Ministerio de Educación y Cultura a través del Programa de Formación de Personal Investigador en centros privados de I+D. Asimismo, queremos dar las gracias a Juan Luis Pina y Sixto Rodríguez por la aportación de los datos de generación de la Central Térmica de Puente Nuevo. La actualización de algunos datos y la mejora del texto ha sido posible gracias a las aportaciones de dos revisores anónimos.

Bibliografía

BANKS F.E., 1994. Electricity princing in Sweden in theory and practice. Energy Resources, 16: 519-530.

BANKS F.E., 1996. Economics of electricity deregulation and privatization: an introductory survey. Energy, 21: 249-261.

BARNTHOUSE L.W., 2000. Impacts of power-plant cooling system on estuarine fish populations: the Hudson River after 25 years. Environmental Science and Policy, 3: 341-348.

BENNETT W.A., BETTINGER T.L., 1997. Temperature tolerance of the sheppshead minnow, *Cyprinodon variegatus*. Copeia, 1997: 77-87.

BEVELHIMER M., BENNETT W., 2000. Assessing cumulative thermal stress in fish during chronic intermittent exposure to high temperatures. Environmental Science and Policy, 3: 211-216.

BLOOMFIELD P., 1976. Fourier analysis of time series: an introduction. Ed. John Wiley & Sons. New York.

BOE 28-11-1997. Ley 54/1997, de 27 de noviembre, del Sector Eléctrico, núm. 285: 35097-35126.

BROWN L., 2000. Acuicultura para veterinarios. Producción y clínica de peces. Ed. ACRIBIA S.A. Zaragoza.

BURNS J.R., 1976. The reproductive cycle and its environmental control in the pumpkinseed, *Lepomis gibbosus* (Pisces Centrarchidae). Copeia, 3: 449-455.

COBO A., GONZÁLEZ-LÓPEZ D., IGLESIAS-ARGÜELLES V., LEDESMA F., LUNA-SOTORRIO L., MARTÍNEZ F.J., MARTÍN-HERNÁNDEZ A., FERNÁNDEZ-POLANCO J., RUESGA S.M., SOMOHANO F., TRESPALACIOS-GUTIÉRREZ J.A., 1999. La acuicultura. Biología, regulación, fomento, nuevas tendencias y estrategia comercial. Tomo II: Economía y gestión de la acuicultura. Ed. Mundi-Prensa. Madrid.

COLL J., 1991. Acuicultura marina animal. Ed. Mundi-Prensa. Madrid.

COLL J.M., 2001. Actualidad y futuro de la acuicultura española. Aquatic, 14: 1-13.

COX D.K., COUTANT C.C., 1981. Growth dynamics of juvenile striped bass as a function of temperature and ration. Transactions of the American Fisheries Society, 110: 226-238.

DEGANI G., LEVANON D., GALLAGHER M.L., 1988. Relationship between growth, food conversion, body size, body composition and temperature in the European eel, *Anguilla anguilla* L. Aquaculture and Fisheries Management, 19: 139-143.

DOSORETZ C., DEGANI G., 1987. Effect of fat rich diet and temperature on growth and body composition of european eels (*Anguilla anguilla*). Comparative Biochemistry and Physiology, 87A(3): 733-736.

ENGELSMA M.Y, HOUGEE S., NAP D., HOFENK M., ROMBOUT J.H.W.M., VAN MUISWINKEL W.B, LIDY B.M., KEMENADE V.V., 2003. Multiple acute temperature stress affects leucocyte populations and antibody responses in common carp, *Cyprinus carpio* L. Fish and Shellfish Immunology, 15: 397-410.

FAO, 2000. Fishstat plus: universal software for fishery statistical time series (v. 2.3).

GUTIÉRREZ-ESTRADA J.C., 2003. Desarrollo y evaluación de modelos para la toma de decisiones. Caracterización de la producción de anguilas (*Anguilla anguilla* L.) en sistemas intensivos. Tesis Doctoral, Universidad de Córdoba.

HEATH A.G., TURNER B.J., DAVIS W.P., 1993. Temperature preferences and tolerances of three fish species inhabiting hyperthermal ponds on mangrove insland. Hydrobiologia, 259: 47-53.

HOKANSON K.E.F., KLEINER C.F., THORSLUND T.W., 1977. Effects of constant temperatures and diel temperature fluctuations on specific growth and mortality rates and yield of juvenile rainbow trout, *Salmo gairdneri*. Journal of the Fisheries Research Board of Canada, 34: 639-648.

ISRAELI-WEINSTEIN D., KIMMEL E., 1998. Behavioral response of carp (*Cyprinus carpio*) to ammonia stress. Aquaculture, 165: 81-93.

KONSTANTIVOV A.S., ZDANOVICH V.V., 1987. Peculiarities of fish growth in relation to temperature fluctuation. Journal of Ichthyologica, 26: 65-74.

LUKSIENE D., SANDSTRÖM O., 1994. Reproductive disturbance in a roach (*Rutilus rutilus*) population affected by cooling water discharge. Journal of Fish Biology, 45: 613-625.

MARIAZZI A.A., DONADELLI J.L., ARENAS P., DI SIERVI M.A., BONETTO C., 1992. Impact of a nuclear power plant on water quality of Embalse del Río Tercero reservoir, (Córdoba, Argentina). Hydrobiologia, 246: 129-140.

MÁS-ÁLVAREZ B., BARRERA-OROZCO R., 1989. Producción de anguilas. Hojas divulgadoras (Nº: 14/89 HD) del Ministerio de Agricultura Pesca y Alimentación. Madrid.

MAULE A.G., SCHRECK C.B., 1990. Changes in numbers of leukocytes in immune organs of juvenile Coho salmon after acute stress or cortisol treatment. Journal of Aquatic Animal and Health, 2: 298-304.

MAZEAUD M.M., MAZEAUD F., DONALDSON E.M., 1977. Primary and secondary effects of stress in fish: some new data with a general review. Transactions of the American Fisheries Society, 106(3): 201-212.

NASH C.E., PAULSEN C.L., 1981. Water quality changes relevant to heated effluents and intensive aquaculture. En Proceedings of the World Symposium on Aquaculture 'Heated Effluents and Recirculation System'. Berlín (Alemania).

OTNES R.K., ENOCHSON L., 1978. Applied time series analysis. Ed. Wiley Interscience. New York.

OTTO R.G., 1974. The effects of acclimation to cyclic thermal regimes on heat tolerance of the western mosquitofish. Transactions of the American Fisheries Society, 103: 331-335.

PALACKOVA J., GAJDUSEK S., JIRASEK J., FASAIC K., 1990. Effect of sublethal concentration of ammonia in water on changes in and correlations of some biochemical indices in carp fry (*Cyprinus carpio* L.). Ichthyologia, 22(1): 57-67.

PARK H.H., 1998. Analysis and prediction of walleye pollock (*Theragra chalcogramma*) landings in Korea by time series analysis. Fisheries Research, 38: 1-7.

RICHKUS W.A., MCLEAN R., 2000. Historical overview of the efficacy of two decades of power plant fisheries impact assessment activities in Chesapeake Bay. Environmental Sciencie and Policy, 3: 283-293.

SODERBERG R.W., 1990. Temperature effects on the growth of blue tilapia in intensive aquaculture. The progressive Fish-Culturist, 52: 155-157.

SYLVESTER J.R., 1972. Possible effects of thermal effluents on fish: a review. Environmental Pollution, 3(3): 205-215.

VAN WINKLE W., ROSE K.A., SHUTER B.J., JAGER H.I., HOLCOMB B.D., 1997. Effects of climatic temperature change on growth, survival, and reproduction of rainbow trout: predictions from a simulation model. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciencies, 54: 2526-2542.

VEIL A.J., 1998. The potential for effluent trading in the energy industries. Environmental Science and Policy, 1: 39-49.

(Aceptado para publicación el 17 de febrero de 2004).