

## **CO2 EMISSIONS AND ITS RELATIONSHIP WITH THE PRODUCT QUALITY AND PROCESS AVAILABILITY**

Calvo, L. M.; Domingo Navas, R.

UNED

This paper conducts an analysis of the influence of the product and process quality on the CO<sub>2</sub> emissions, and thus to determine whether CO<sub>2</sub> emissions can be a helpful indicator of the variables related to the quality and maintenance. Therefore, the possible use of the emissions as an indicator of the efficiency of the plant production is studied. In this sense, we analyse two components of efficiency, quality and availability, and the possible link with the sustainability of the process. The latter is of particular interest given the growing concern about the environment and the relevant legislation increasingly demanding.

For this purpose, the paper presents a case study focused on the drying process of paper manufacturing, which is responsible of almost all emissions CO<sub>2</sub> in a plant of this kind, and also it is the bottleneck manufacturing process. A statistical analysis by analysis of variance and a calibration of different regression models are carried out, to identify significant variables most influential and quantify.

**Keywords:** *Processes; Emissions; Availability; Maintenance; Quality*

### **LAS EMISIONES DE CO<sub>2</sub> Y SU RELACIÓN CON LA CALIDAD DEL PRODUCTO Y LA DISPONIBILIDAD DEL PROCESO**

En este artículo se lleva a cabo un análisis sobre la influencia de la calidad del producto y del proceso en las emisiones de CO<sub>2</sub>, y de esta manera comprobar si las emisiones de CO<sub>2</sub> pueden ser un indicador adecuado de las variables vinculadas con la calidad y el mantenimiento, y por tanto de la eficiencia de la planta productiva. En este sentido, se analizan dos componentes de la eficiencia, la calidad y la disponibilidad, y su posible vinculación con la sostenibilidad del proceso. Este último aspecto es de especial interés, dada la preocupación creciente por el medio ambiente y la legislación al respecto cada vez más exigente.

Para ello, se presenta el estudio de un caso, centrado en el proceso de secado de la fabricación de papel, que es el responsable de la mayor parte de las emisiones de CO<sub>2</sub> en una planta de este tipo, y además el cuello de botella del proceso de fabricación. Un análisis estadístico, por medio del análisis de la varianza y de la calibración de diferentes modelos de regresión, permite identificar las variables significativas de mayor influencia y cuantificarlas.

**Palabras clave:** *Procesos; Emisiones; Disponibilidad; Mantenimiento; Calidad*

Correspondencia: rdomingo@ind.uned.es

## 1. Introducción

El control de los procesos de producción constituye una actividad relevante en la industria. Para llevarlo a cabo, habitualmente se utilizan sistemas que permiten la recopilación y el análisis de numerosos datos. No obstante, no toda la información puede emplearse en la medida de la eficiencia del proceso. Las actividades de mantenimiento tienen especial importancia en este control, y en particular en los procesos continuos, y más aún cuando estas actividades están centradas en el cuello de botella del proceso (Lin & Ni, 2009); en este sentido se puede identificar la fabricación del papel, con el proceso de secado como cuello de botella. Por esta razón se suelen utilizar complejos sistemas de soporte que ayudan a tomar decisiones (Lin & Ni, 2012), pero en la planta industrial, el uso de un indicador simple puede facilitar la gestión y contribuir a la mejora de los resultados.

Además, en la actualidad, existe una gran sensibilización sobre las emisiones de gases de efecto invernadero y las consecuencias que provocan en la atmósfera y el medioambiente, en general. En este sentido, en España se han sucedido ya desde 2005 dos planes de asignación de derechos de emisión (Real Decreto Ley 5/2004, Real Decreto 1866/2004, Real Decreto 60/2005, Real Decreto 777/2006, Real Decreto 1370/2006) con el objetivo de concienciar a la industria en cuanto a la importancia del control de las emisiones que se genera en sus procesos y forzarla a reducir el volumen de dichas emisiones.

Así mismo, existe un tercer plan (Ley 13/2010) que empieza en 2013 y tendrá validez hasta 2020. Con este último plan, se avanza un paso más forzando esta vez a reducir las emisiones drásticamente o incluso eliminarlas mediante la imposición de una tasa al uso. De esta manera, se ha forzado a que las emisiones de CO<sub>2</sub> representen un coste elevado en los procesos de producción, en los que hay un alto consumo de energía térmica, lo que seguramente afectará en gran medida a la competitividad de las fábricas y puede abocar a más de una planta al cierre.

Desde el inicio del primer plan de asignación de 2005, derivado del protocolo de Kioto, las emisiones de CO<sub>2</sub> frecuentemente, se han considerado como una consecuencia del proceso de producción. Estas emisiones suelen significar un coste administrativo y son percibidas más como un impuesto que como una posible herramienta a través de la cual evaluar el funcionamiento del proceso de producción.

### 1.1 Antecedentes

La literatura científica muestra cómo el concepto de sostenibilidad ha sido relacionado con la eficiencia en producción (Aguado, Alvarez & Domingo, 2012), aunque no así con el mantenimiento de la planta. Se ha revisado la información publicada sobre la fabricación de papel y su proceso de secado; en especial se han encontrado publicaciones centradas en revisar la influencia del proceso de secado en las características del papel (Karlsson, 2000; Bicudo, 2008; Triantafillopoulos, 2010; Hostetler, Pelletier et al., 2005), los nuevos sistemas para mejorar la eficiencia del proceso (Laurijssen, Gream et al., 2010; Martin, Drotz et al., 2004), la influencia de los elementos de la sequería en el proceso de secado (Barber, 2011) y en el diseño y dimensionamiento (Bauer, Zeyringer et al. 1998) de esta sección. Se ha encontrado numerosos estudios sobre el aspecto energético (Sivill, Ahtila et al., 2005; Zvolinschi, Johannessen et al., 2006) y su análisis para maximizar la recuperación de energía (Laurijssen, Gream et al., 2010; Sivill & Ahtila, 2009), sobre la reducción de consumo de energía (Austing, 2010) por medio del control del proceso de producción y la relación entre eficiencia energética y productividad (Virtanen, Haverin et al. 2010).

En cuanto a las referencias relativas a la implantación del mantenimiento productivo total para la mejora de producción (Chand & Shirvani, 2000) no se ha encontrado alusiones

respecto al uso de indicadores medioambientales o a las emisiones de CO<sub>2</sub> como indicador para evaluar la eficiencia y la capacidad de la producción.

Las emisiones de CO<sub>2</sub> generadas se ven afectadas de manera significativa por el estado de la instalación de aprovechamiento térmico del proceso. La limitación de las emisiones de CO<sub>2</sub> supone una limitación de facto de la producción. En consecuencia, la importancia de su seguimiento y control se hace evidente.

## 1.2 Objetivos

En un estudio previo (Calvo & Domingo, 2013) se introdujo un nuevo indicador, "Emisiones de CO<sub>2</sub>/Producción", con el objetivo de ver la relación entre él y las variables de disponibilidad de máquina debidas al mantenimiento. El resultado obtenido permitía afirmar, en una primera aproximación, que esta ratio podía ser útil para identificar variables que mejoren la eficiencia y la sostenibilidad de la planta, pero que requería de un análisis de datos diarios.

En ese estudio se ponía también de manifiesto que puede haber otras variables capaces de influir en el indicador, como la calidad de producto fabricado y el gramaje de papel. Cada calidad que se fabrica tiene una formulación distinta tanto de materia prima como de productos añadidos, lo que hace que cada calidad pueda tener una característica específica en la facilidad de eliminación del agua que contiene y por lo tanto un nivel de indicador emisiones CO<sub>2</sub> (ton)/producción (ton) papel de partida distinto.

En este sentido, se continúa el análisis del proceso y el estudio de los datos para determinar qué otras variables en el proceso tienen influencia y cuáles de ellas son más significativas.

El estudio pretende demostrar que se puede introducir el indicador emisiones de CO<sub>2</sub> /producción como indicador válido para medir el estado de mantenimiento y puesta a punto de la maquinaria del proceso. El uso de este indicador puede ser una herramienta para ayudar a encontrar las causas de las disminuciones de la producción debidas a ineficiencias y para establecer las condiciones operativas que permitan un incremento de la capacidad de producción en el cuello de botella del proceso de secado del papel, la sequería.

El estudio también pretende poner de manifiesto la relación que existe entre el indicador y la calidad del papel producido. El uso de este indicador podrá ser usado por otras empresas transformadoras de papel para evaluar la huella medioambiental, y en concreto la huella de carbono de los productos que manufacturan y facilitar la realización de la selección del papel como materia prima bajo este nuevo parámetro.

## 2. Metodología

Para el desarrollo del presente artículo, se ha empleado el estudio de un caso. Para ello, se ha tomado como referencia una planta de fabricación de papel y se han tomado datos de su cuello de botella, la sección de sequería, que es la sección responsable del 100% de las emisiones de CO<sub>2</sub> de esta planta.

Los datos usados en el estudio, recopilados con una frecuencia adecuada, medidos de acuerdo a la legislación española vigente (Real Decreto 1315/2005, Ley 1/2005, Decisión nº 2007/589/CE), son los relativos a producción, emisiones y disponibilidad medida según Nakajima (Nakajima, 1988). Dichas variables son analizadas estadísticamente para encontrar la relación entre ellas y el indicador considerado.

El número de secadores, la capacidad de evaporación del sistema de sequería y la necesidad de obtener un papel con una sequedad controlada condicionan la velocidad del

proceso, que determina la diferencia entre la capacidad teórica de producción y la real obtenida.

El indicador a introducir, emisiones CO<sub>2</sub> (ton)/producción (ton) de papel, se obtiene como ratio entre las emisiones de CO<sub>2</sub> verificadas en cada periodo considerado y las toneladas de papel producido en la planta (subinstalación) en el mismo periodo.

El indicador propuesto (emisiones CO<sub>2</sub> (ton)/producción (ton) de papel) cumple las premisas:

- Esta unívocamente definida su obtención.
- Es reproducible y revisable en una misma instalación a lo largo del tiempo.
- Es reproducible en diferentes instalaciones.
- Es comparable entre distintas instalaciones pudiéndose establecer *benchmark* de producto.

En el cálculo de las emisiones de CO<sub>2</sub> se sigue la metodología indicada en el apartado “Cálculo de emisiones y los factores de emisión” procedente del Informe Inventarios GEI (Ministerio de Medio Ambiente, 2011) para la Aplicación de la Directiva de Comercio de Emisiones, reflejada en la ecuación (1).

$$\text{Emisiones CO}_2(\text{ton}) = \text{Datos de la actividad} \times \text{Factor de emisión} \times \text{Factor de oxidación} \quad (1)$$

El cálculo de la producción de la subinstalación para establecer el indicador en los periodos de referencia, se hará siguiendo las directrices indicadas en las guías metodológicas de ECOFIS para la Comisión Europea (European Commission, 2011a, 2011b).

El estudio general se inicia con los datos de 30 meses, correspondientes al periodo 2009, 2010 y primer semestre del 2011 por considerarse un periodo representativo de producción en el que no ha habido cambios en las condiciones de máquina, ni se han realizado reformas que modifiquen significativamente las características de la máquina y que afecten a su capacidad teórica de producción. De la misma manera se lleva a cabo el estudio de detalle en base en los datos recopilados con los registros horarios de la producción durante el año 2012. Este periodo también se considera lo suficientemente homogéneo y representativo.

Los datos obtenidos del indicador en cuanto a las calidades del papel, el gramaje del mismo y la temperatura exterior han sido sometidos a un análisis de la varianza (ANOVA) con el objeto de determinar si alguno de ellos tiene un efecto significativo en los resultados finales, lo que puede ser determinado en el caso de que P-valor sea menor de 0,05 para un nivel de confianza del 95,0%, una vez realizado el test de Fisher-Snedecor (Spiegel, Schiller & Srinivasan, 2012). Además se han llevado a cabo un análisis de regresión, aplicando modelos generales lineales ya que permiten encontrar relaciones entre factores cuantitativos y cualitativos. Finalmente, se ha aplicado el test de Student-Newman-Keuls con el objeto de encontrar los niveles de cada factor que son estadísticamente similares. El software empleado ha sido Statgraphics.

### **3. El Indicador “Emisiones de CO<sub>2</sub>/Producción” frente a la Calidad del Producto Fabricado y al Gramaje del Papel.**

La planta seleccionada para el estudio, produce un amplio rango de calidades de papel; C0A, C1A, C2A, C3A, C4A, C5A y C6A. Cada calidad de papel fabricado se diferencia de las demás por sus características mecánicas, basadas en una composición distinta de materia prima y aditivos químicos. Esta diferencia puede generar un comportamiento distinto a la hora del secado, lo que podría ser una causa de variación del indicador.

Dentro de cada calidad, la planta fabrica papel con un amplio rango de gramajes que va desde los 150 gr/m<sup>2</sup> hasta los 750 gr/m<sup>2</sup>. Este amplio rango tanto de gramajes como de calidades, hecho poco común dentro de la fabricación de papel, nos permitirá estudiar de

forma más amplia la variación del indicador y la influencia que las condiciones externas pueden tener para cada calidad y gramaje de papel producido.

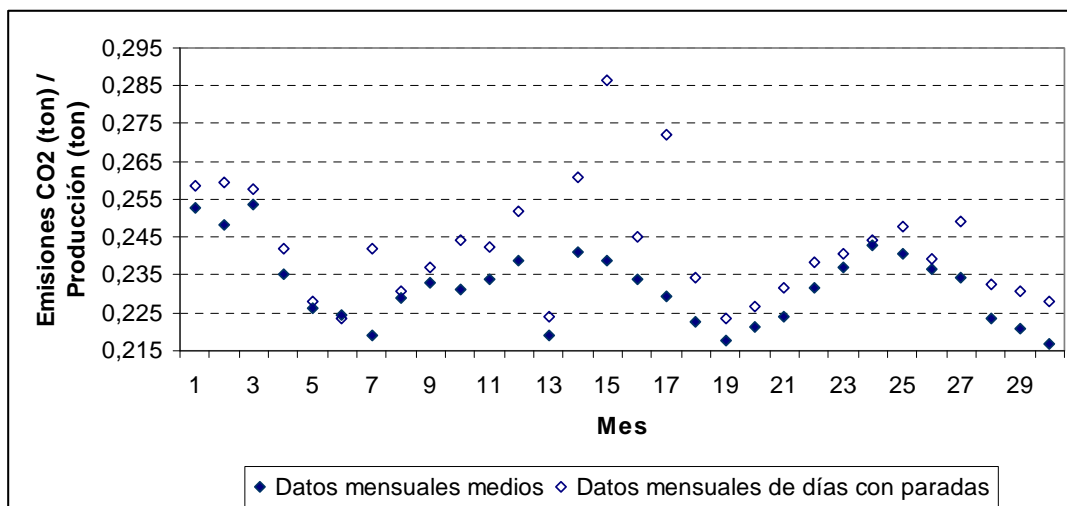
En la fabricación del papel de esta planta, el gramaje puede variar entre los límites indicados en intervalos muy pequeños (entre 5 y 10 gr/m<sup>2</sup>). Para facilitar el estudio se han seleccionado los 4 gramajes más habituales; 200 gr/m<sup>2</sup>, 350 gr/m<sup>2</sup>, 500 gr/m<sup>2</sup> y 630 gr/m<sup>2</sup>. Dichos gramajes constituyen una parte significativa de la producción.

Para facilitar el análisis e interpretación de los datos se analiza gráficamente la información de la variación del indicador emisiones de CO<sub>2</sub>/producción (en media mensual). Se considera primeramente el indicador teniendo en cuenta los datos globales del mes (producción, disponibilidad y emisiones) y se repite el cálculo para el mismo mes considerando únicamente los días del mes en los que la disponibilidad no ha sido del 100 % por averías en el proceso, calculándose el indicador señalado.

### 3.1 Las emisiones frente a la disponibilidad de la planta

En la Figura 1 se observa que en todos los casos la media del indicador emisiones CO<sub>2</sub>/producción de papel en los días de disponibilidad inferior a la unidad es superior a la media mensual general de dicho indicador. Este hecho confirma a priori que la disponibilidad de máquina está relacionada con el valor del indicador considerado. También se observa un comportamiento cíclico en las emisiones, que da lugar a tener que considerar las variables externas que influyen en la fabricación del papel, pues en general, los meses con mayores emisiones (meses 1, 2, 3, 12, 14, 23, 24, 25 y 26) se corresponden con periodos de menor temperatura y mayor humedad externas.

Figura 1. Comparación de los valores mensuales y de los valores medios de los días con párale andas de las Emisiones CO<sub>2</sub> (ton)/Producción (ton) papel



### 3.2 Las emisiones frente a las características del producto y la temperatura exterior

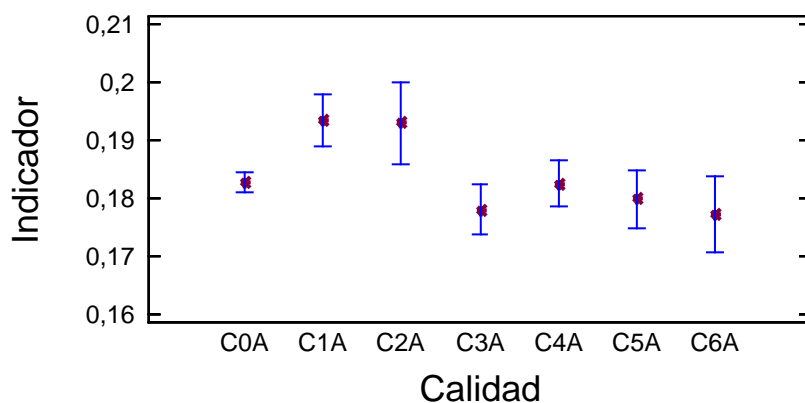
El análisis de la varianza realizado, basado en el test de Fisher-Snedecor, permite observar el grado de influencia de las características del producto y de la temperatura exterior en el indicador seleccionado. Este análisis ANOVA (Tabla 1) señala que los tres factores estudiados, tienen una influencia significativa en el valor obtenido del indicador, con un nivel de confianza del 95,0% debido a que se ha alcanzado un P-valor menor de 0,05 para cada

una de ellos; asimismo determina que el factor de mayor influencia es la temperatura exterior.

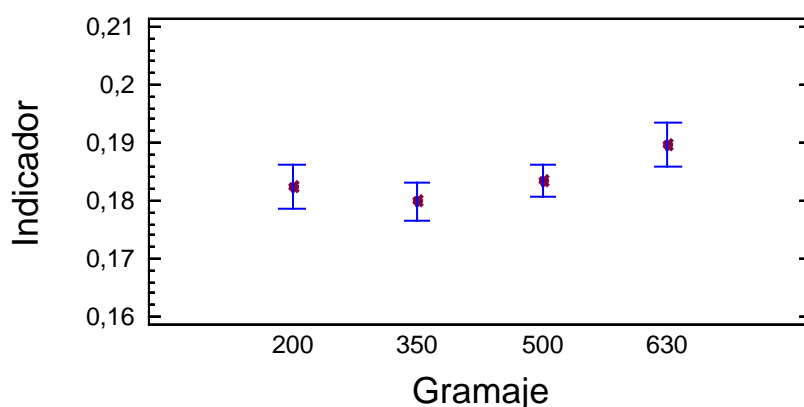
**Tabla 1: Análisis de la Varianza**

|             | Suma de cuadrados | Grados de libertad | Cuadrados medios | F-ratio | P-valor  |
|-------------|-------------------|--------------------|------------------|---------|----------|
| Calidad     | 0,0040            | 6                  | 0,0007           | 6,65    | <0,00001 |
| Gramaje     | 0,0065            | 3                  | 0,0022           | 21,46   | <0,00001 |
| Temperatura | 0,0204            | 8                  | 0,0026           | 25,36   | <0,00001 |
| Residuos    | 0,1142            | 1131               | 0,0001           |         |          |
| Total       | 0,1472            | 1148               |                  |         |          |

**Figura 2. Valores medios e intervalos de confianza al 95,0% del indicador “Emisiones CO2 (ton)/Producción (ton) papel” respecto a los tipos de calidad**



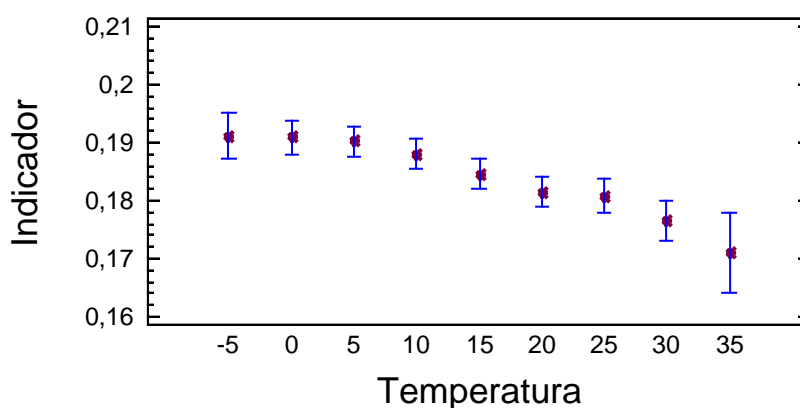
**Figura 3. Valores medios e intervalos de confianza al 95,0% del indicador “Emisiones CO2 (ton)/Producción (ton) papel” respecto al gramaje**



En cuanto a una información más detallada, los valores de las medias e intervalos de confianza al 95,0%, para cada tipo de calidad, gramaje e intervalos de temperatura, pueden

observarse en las Figuras 2, 3 y 4. Aunque los valores del indicador debidos al tipo de calidad sufre variaciones, éstas no parecen seguir un patrón definido (Figura 2). En cuanto al gramaje, se observa que su incremento produce un aumento del indicador, con la excepción del catalogado como 350 gr/m<sup>2</sup> (ver Figura 3), lo que habrá de ser investigado en futuros trabajos, al igual que el tipo de calidad. La influencia de la temperatura externa de la planta puede apreciarse en la Figura 4, en la que se evidencia que su aumento tiene un efecto positivo en el indicador objeto de estudio, pues provoca su reducción.

**Figura 4. Valores medios e intervalos de confianza al 95,0% del indicador “Emisiones CO2 (ton)/Producción (ton) papel” respecto a la temperatura**

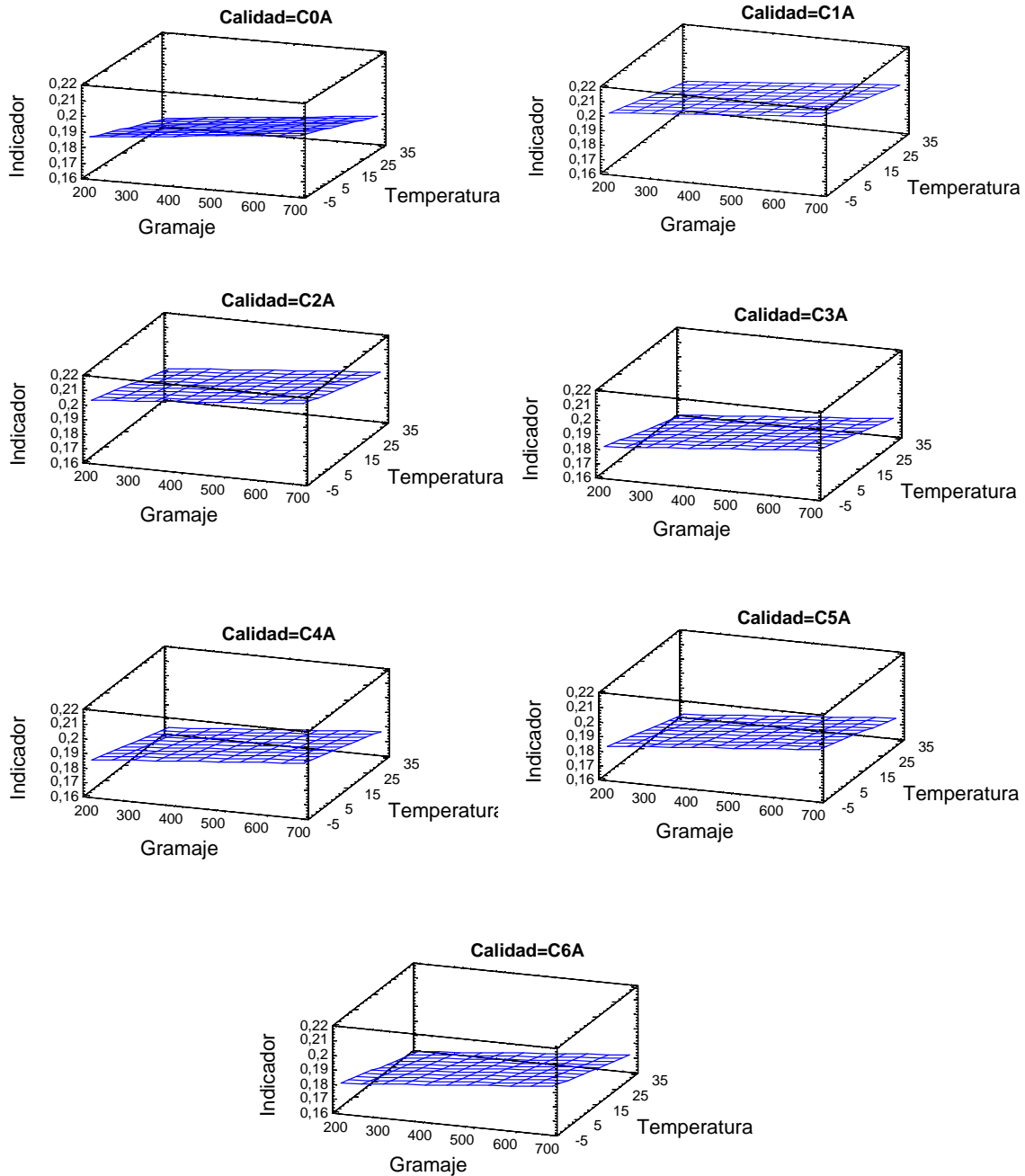


La determinación de una relación entre el indicador y cada factor, se encuentra reflejada en la Tabla 2, en la que para cada tipo de calidad se describe la ecuación de regresión lineal, considerando el gramaje y la temperatura. En cada una de estas ecuaciones se mantienen los coeficientes del gramaje y la temperatura, variando sólo la constante. En coherencia con la información obtenida de las Figuras 3 y 4, el gramaje tiene una incidencia de aumento en el indicador, mientras que la temperatura lo disminuye. Para concretar la influencia de cada clase de gramaje e intervalo de temperatura, se muestran los valores en la Figura 5, en la que se aprecia el notable efecto de la constante para los tipos de calidad C1A y C2A.

**Tabla 2: Regresión lineal generalizada**

| Tipo de calidad | Regresión  | Ecuación |
|-----------------|--|----------|
| C0A             | Indicador = 0,1786 + 2,5·10 <sup>-5</sup> ·Gramaje - 4,8·10 <sup>-4</sup> ·Temperatura | (2)      |
| C1A             | Indicador = 0,1938 + 2,5·10 <sup>-5</sup> ·Gramaje - 4,8·10 <sup>-4</sup> ·Temperatura | (3)      |
| C2A             | Indicador = 0,1947 + 2,5·10 <sup>-5</sup> ·Gramaje - 4,8·10 <sup>-4</sup> ·Temperatura | (4)      |
| C3A             | Indicador = 0,1731 + 2,5·10 <sup>-5</sup> ·Gramaje - 4,8·10 <sup>-4</sup> ·Temperatura | (5)      |
| C4A             | Indicador = 0,1773 + 2,5·10 <sup>-5</sup> ·Gramaje - 4,8·10 <sup>-4</sup> ·Temperatura | (6)      |
| C5A             | Indicador = 0,1750 + 2,5·10 <sup>-5</sup> ·Gramaje - 4,8·10 <sup>-4</sup> ·Temperatura | (7)      |
| C6A             | Indicador = 0,1725 + 2,5·10 <sup>-5</sup> ·Gramaje - 4,8·10 <sup>-4</sup> ·Temperatura | (8)      |

**Figura 5. Valores del indicador “Emisiones CO2 (ton)/Producción (ton) papel” respecto a gramaje y a la temperatura para cada tipo de producto**



Finalmente, el test de Student-Newman-Keuls (Tabla 3) muestra las diferencias existentes entre las medias de cada tipo de calidad, gramaje e intervalo de temperatura, permitiendo identificar, los valores que pueden considerarse estadísticamente diferentes a un nivel de confianza del 95,0% o bien homogéneos. Así, los tipos de calidad pueden agruparse en dos grupos constituidos, cada uno de ellos, por calidades homogéneas entre ellas, como son un primer grupo formado por C0A, C3A, C4A, C5A y C6A, y un segundo grupo integrado por C1A y C2A.



**Tabla 3: Contraste de Calidad, Gramaje y Temperatura en el test de Student-Newman-Keuls**

| Contraste de Calidades | Diferencias | Contraste de Gramaje | Diferencias | Contraste de Temperatura | Diferencias |
|------------------------|-------------|----------------------|-------------|--------------------------|-------------|
| C0A - C1A              | *-0,015     | 200 – 350            | *0,0027     | -5 – 0                   | 0,0002      |
| C0A - C2A              | *-0,016     | 200 – 500            | -0,0009     | -5 – 5                   | 0,0008      |
| C0A - C3A              | 0,0054      | 200 – 630            | *-0,0071    | -5 – 10                  | 0,0031      |
| C0A - C4A              | 0,0013      | 350 – 500            | *-0,0036    | -5 – 15                  | *0,0065     |
| C0A - C5A              | 0,0036      | 350 – 630            | *-0,0098    | -5 – 20                  | *0,0097     |
| C0A - C6A              | 0,0061      | 500 – 630            | *-0,0062    | -5 – 25                  | *0,0103     |
| C1A - C2A              | -0,0009     |                      |             | -5 – 30                  | *0,0147     |
| C1A - C3A              | *0,0207     |                      |             | -5 – 35                  | *0,0199     |
| C1A - C4A              | *0,0165     |                      |             | 0 – 5                    | 0,0006      |
| C1A - C5A              | *0,0188     |                      |             | 0 – 10                   | 0,0029      |
| C1A - C6A              | *0,0214     |                      |             | 0 – 15                   | *0,0063     |
| C2A - C3A              | *0,0216     |                      |             | 0 – 20                   | *0,0095     |
| C2A - C4A              | *0,0174     |                      |             | 0 – 25                   | *0,0101     |
| C2A - C5A              | *0,0198     |                      |             | 0 – 30                   | *0,0144     |
| C2A - C6A              | *0,0223     |                      |             | 0 – 35                   | *0,0197     |
| C3A - C4A              | -0,0042     |                      |             | 5 – 10                   | 0,0023      |
| C3A - C5A              | -0,0018     |                      |             | 5 – 15                   | *0,0056     |
| C3A - C6A              | 0,0007      |                      |             | 5 – 20                   | *0,0088     |
| C4A - C5A              | 0,0023      |                      |             | 5 – 25                   | *0,0094     |
| C4A - C6A              | 0,0048      |                      |             | 5 – 30                   | *0,0138     |
| C5A - C6A              | 0,0025      |                      |             | 5 – 35                   | *0,0191     |
|                        |             |                      |             | 10 – 15                  | 0,0034      |
|                        |             |                      |             | 10 – 20                  | *0,0066     |
|                        |             |                      |             | 10 – 25                  | *0,0071     |
|                        |             |                      |             | 10 – 30                  | *0,0115     |
|                        |             |                      |             | 10 – 35                  | *0,0168     |
|                        |             |                      |             | 15 – 20                  | 0,0032      |
|                        |             |                      |             | 15 – 25                  | 0,0038      |
|                        |             |                      |             | 15 – 30                  | *0,0081     |
|                        |             |                      |             | 15 – 35                  | *0,0135     |
|                        |             |                      |             | 20 – 25                  | 0,0006      |
|                        |             |                      |             | 20 – 30                  | *0,0049     |
|                        |             |                      |             | 20 – 35                  | *0,0103     |
|                        |             |                      |             | 25 – 30                  | *0,0043     |
|                        |             |                      |             | 25 – 35                  | *0,0097     |
|                        |             |                      |             | 30 – 35                  | *0,0053     |

\*Denota diferencias significativas

En cuanto al tipo de gramaje, solamente se identifica un grupo homogéneo formado por los gramajes de 200 y 500 gr/m<sup>2</sup>. Finalmente, respecto a los intervalos de temperatura, resultan semejantes, las temperaturas entre 20 y 30 °C por un lado, y entre -5 y 10 °C por otro.

#### 4. Conclusiones

En este artículo se ha llevado a cabo un estudio sobre la influencia de variables como disponibilidad de una planta, características de calidad del producto y factores externos en las emisiones de CO<sub>2</sub> /producción. Su aplicación a una planta de producción de papel, en concreto en el cuello de botella de la planta, como es la sequería de la misma, ha permitido encontrar unas primeras evidencias, en cuanto a lo siguiente:

- La reducción de la disponibilidad de la planta lleva a una ratio menor de emisiones CO<sub>2</sub>/producción, a pesar de que las paradas sean debidas a averías.
- La calidad y el gramaje del papel parecen incidir en la ratio CO<sub>2</sub>/producción, aunque los resultados son dependientes del tipo de calidad y de la clase de gramaje.
- La temperatura exterior a la que está sometida la planta de fabricación influye en la ratio CO<sub>2</sub>/producción, encontrándose valores más bajos del indicador a medida que aumenta la temperatura.

#### 5. Referencias

- Aguado, S., Alvarez, R. & Domingo, R. (2012). Model of efficient and sustainable improvements in a lean production system through processes of environmental innovation. *Journal of Cleaner Production*, pp. 1-8. doi:10.1016/j.jclepro.2012.11.048
- Austing, P. (2010). Reducing energy consumption in papermaking using advanced process control. ELCF Seminar, Wed 3 Feb 2010, University of Cambridge.
- Barber, E. (2011). Xerium Dryer Fabric Cleaning, [Internet] *Disponible en* www.xerium.com.
- Bauer, W., Zeyringer, E. & Ullrich, H. (1998). Important drying parameters for the layout of a new production line. *Coating Conference Proceedings*.
- Bicudo, L. C. (2008). Avalaioes na área de secagem e sua influencia na qualidade do papel. *Revista técnica Opapel*, 4, 48-56.
- Calvo, L. M. & Domingo, R. (2013). A first approach to the use of CO<sub>2</sub> emissions as a maintenance indicator in industrial plants. *Proceedings of the 5th Manufacturing Engineering Society International Conference – Zaragoza – June 2013*
- Chand, G. & Shirvani, B. (2000). Implementing of TPM in cellular manufacture. *Journal of Materials Processing Technology*, 103, 149-154.
- España. Ley 13/2010, de 5 de Julio, que modifica la Ley 1/2005 que regula el régimen de comercio de derechos de emisión. *Boletín Oficial del Estado*, de 5 de julio de 2010, núm. 163, pp.59586-59627.
- España. Ley 1/2005, de 9 de marzo, por la que se regula el régimen del comercio de derechos de emisión de gases de efecto invernadero. *Boletín Oficial del Estado*, de 10 de marzo de 2005, núm. 59, pp. 8405-8420.
- España. Real Decreto 1315/2005, de 4 de noviembre, que establecen las bases de los sistemas de seguimiento y verificación de emisiones de gases de efecto invernadero en instalaciones. *Boletín Oficial del Estado*, de 9 de noviembre de 2005, núm. 268, pp. 36674-36677.
- España. Real Decreto 1370/2006, de 24 de Noviembre, por el que se aprueba el Plan Nacional de Asignación de derechos de emisión de gases de efecto invernadero, 2008-2012. *Boletín Oficial del Estado*, de 25 de noviembre de 2006, núm. 282, pp-41320-41440.

- España. Real Decreto 1866/2004, de 6 de septiembre, por el que se aprueba el Plan nacional de asignación de derechos de emisión, 2005-2007. (C de E en BOE 217 de 08/09/04). *Boletín Oficial del Estado*, de 7 de septiembre de 2004, núm. 216, pp. 30616-30642.
- España. Real Decreto 60/2005, de 21 de enero, modifica al Real Decreto 1866/2004, por el que se aprueba el Plan nacional de asignación de derechos de emisión, 2005-2007. *Boletín Oficial del Estado*, de 22 de enero de 2005, núm. 19, pp. 2666-2669.
- España. Real Decreto 777/2006, de 23 de Junio, modifica al Real Decreto 1866/2004, por el que se aprueba el Plan nacional de asignación de derechos de emisión, 2005-2007. *Boletín Oficial del Estado*, de 24 de junio de 2006, núm. 150, pp. 24001-24004.
- España. Real Decreto Ley 5/2004, de 27 de agosto, por el que se regula el régimen de comercio de derechos de emisión de gases de efecto invernadero. *Boletín Oficial del Estado*, de 28 de agosto de 2004, núm. 208, pp. 30096-30111.
- Unión Europea. Decisión no 2007/589/CE del Parlamento Europeo, de 18 de julio, por la que se establecen directrices para el seguimiento y la notificación de las emisiones de gases de efecto invernadero de conformidad con la Directiva 2003/87/CE del Parlamento Europeo y del consejo (2012). *Diario Oficial de las Comunidades Europeas*, de 18 de julio de 2007, núm. 229.
- Unión Europea. European Commission – Climate Action, guías metodológicas ECOFIS, 2011a. [Internet] *Disponible en* [http://ec.europa.eu/clima/policies/ets/benchmarking/documentation\\_en.htm](http://ec.europa.eu/clima/policies/ets/benchmarking/documentation_en.htm)
- Unión Europea. European Commission, “Benchmarks for free allocation”, 2011b, Documentos de referencia y guías para el cálculo de asignación de derechos de emisión en los distintos procesos. [Internet] *Disponible en* [http://ec.europa.eu/clima/policies/ets/cap/allocation/documentation\\_en.htm](http://ec.europa.eu/clima/policies/ets/cap/allocation/documentation_en.htm)
- Hostetler, R. E., Pelletier, D. & Cloutie, C. (2005). Effect of drying conditions on the development of binder strength in double coated SBS paperboard. Proc. of TAPPI Coating Conference.
- España. Ministerio de Medio Ambiente. Informe Inventarios GEI Mayo 2011, Anexo 8, Referencia del Inventario para la Aplicación de la Directiva de Comercio de Emisiones” Ministerio de Medio Ambiente. [Internet] *Disponible en* [http://www.magrama.gob.es/es/cambio-climatico/temas/comercio-de-derechos-de-emision/el-comercio-de-derechos-de-emision-en-espana/seguimiento-y-verificacion-de-las-emisiones/val\\_cal\\_net\\_inv\\_nac\\_emi.aspx](http://www.magrama.gob.es/es/cambio-climatico/temas/comercio-de-derechos-de-emision/el-comercio-de-derechos-de-emision-en-espana/seguimiento-y-verificacion-de-las-emisiones/val_cal_net_inv_nac_emi.aspx)
- Karlsson, M. (2000). Papermaking part 2, Drying. *Papermaking Science and Technology series*, 9, 1-6.
- Laurijssen, J., de Gream, F. J., Worrel, E. & Faaij, A. (2010). Optimizing the energy efficiency of conventional multi-cylinder dryers in the paper industry. *Energy*, 35, 3738-3750.
- Lin, L. & Ni, J. (2009). Short-term decision support system for maintenance task prioritization. *International Journal of Production Economics*, 121, 195-202.
- Lin, L. & Ni, J. (2012). Decision support systems for effective maintenance operations. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 61, 411-414.
- Martin, A., Drotz, M., Talja, R., Kiajaluto, S. & Puumalainen, T. (2004). Energy analysis of impulse technology; research-scale experimental papermaking trials and simulations of industrial applications. *Applied Thermal Engineering*, 24, pp. 2411-2425.
- Nakajima, S. (1988). An Introduction to TPM. Productivity Press, Portland, OR.
- Spiegel, M., Schiller, J. & Srinivasan, R. A. (2012). Probability and Statistics, McGraw-Hill, 4ª edición.
- Sivill, L. & Ahtila, P. (2009). Energy efficiency improvement of dryer section heat recovery systems in paper machines – a case of study. *Applied Thermal Engineering*, 29, pp. 3663-3668.
- Sivill, L., Ahtila, P. & Taimisto, M. (2005). Thermodynamic simulation of dryer section heat recovery in paper machines. *Applied Thermal Engineering*, 25, pp. 1273-1292.

- Triantafillopoulos, N. (2010). Nano enhances – Paper coating performance. *Revista TAPPI-PIMA, Noviembre – Diciembre*, 30-34.
- Virtanen, E., Haverin, T. & Mynttinen, S. (2010). Eficiencia energética, operatividad y limpieza: Claves para la productividad en la sequería. *Revista Técnica El Papel, Octubre-Noviembre*, 30-35.
- Zvolinschi, A., Johannessen, E. & Kjelstrup, S. (2006). The second-law optimal operation of a paper drying machine. *Chemical Engineering Science*, 61, pp. 3653-3662.