



# 3<sup>rd</sup> INTERNATIONAL WORKSHOP ADVANCES IN CLEANER PRODUCTION

“CLEANER PRODUCTION INITIATIVES AND CHALLENGES FOR A SUSTAINABLE WORLD”

## Las P+L: el Desarrollo Sustentable y la Educación Ambiental Superior

P. A. O. George

*Investigador independiente*

---

### Resumen

En este trabajo se presentan resumidamente los resultados obtenidos tanto en la reducción como la reutilización, de los desperdicios generados en varios procesos, mediante la aplicación de los principios de las P+L. El objetivo de este trabajo no es solo mostrar la efectividad de tales principios en la gestión de los procesos industriales, sino también mostrar la carga de ciencia requerida para la realización de tales trabajos, con el objetivo de destacar la necesidad de incluir los principios de las P+L en la Educación Ambiental Superior, pues el trabajo de los graduados universitarios tiene una importante incidencia en lograr, o no, un desarrollo sustentable.

**Palabras-llave:** P+L, Educación Ambiental Superior, desarrollo sustentable

---

### 1 Introducción

El concepto de desarrollo sustentable nace de la necesidad de resolver el problema de proveer los bienes y servicios que una población mundial creciente demanda. Lo anterior, tiene la restricción de que los recursos son escasos, y es aquí donde el conocimiento y la ciencia se hacen imprescindibles para aportar soluciones.

El concepto de desarrollo sustentable implica reconocer que las metas ambientales, sociales y económicas están fuertemente relacionadas. El crecimiento a largo plazo depende de un ambiente sano, y los recursos para proteger el ambiente vienen, en parte, del desarrollo económico. De esta forma, la incorporación de un criterio de desarrollo sustentable, es decir, un desarrollo que satisfaga las necesidades del presente sin comprometer la posibilidad de las generaciones futuras de satisfacer sus propias necesidades, es un camino que promueve el progreso social buscando mejorar la calidad de vida en el presente sin dejar de considerar el futuro.

El PNUMA define el concepto de las Producciones más Limpias (P+L) como “La aplicación continua de una estrategia ambiental preventiva e integral a los procesos y productos con el objetivo de reducir riesgos al ser humano y al medio ambiente”. Esta definición está basada en la suposición de que no existe la Producción más Limpia como tal, pues cada proceso de producción o servicios genera alguna forma de contaminación.

Entonces, las P+L resultan esenciales para que el concepto de desarrollo sostenible se vuelva realidad.

El concepto de las P+L se está incorporado gradualmente en las operaciones industriales. Sin embargo, muchos países y compañías no han puesto en práctica este concepto con la rapidez deseada, lo que sugiere la existencia de obstáculos

---

“CLEANER PRODUCTION INITIATIVES AND CHALLENGES FOR A SUSTAINABLE WORLD”

São Paulo – Brazil – May 18<sup>th</sup>-20<sup>nd</sup> - 2011

para su aplicación. No obstante, éstos no son absolutos. La experiencia en todo el mundo indica que el mayor obstáculo es la tendencia humana al conservadurismo y la poca motivación. La falta de conciencia y de información sobre las opciones, y también la carencia de nuevas tecnologías apropiadas, son razones contribuyentes.

Se ha dicho y escrito mucho acerca de la importancia que tienen las nuevas tecnologías. En muchos casos, la tecnología es de gran ayuda para la prevención de la contaminación, pero esto no quiere decir que no pueda hacerse nada sin las nuevas tecnologías. Las P+L hacen referencia a una mentalidad que enfatiza la producción de bienes y servicios con el mínimo impacto ambiental bajo la tecnología actual y límites económicos.

El enfoque de las P+L necesita la participación del personal de producción y operativo de las industrias y de los sectores de servicio, así como también, de especialistas ambientales. El gerente necesita dar incentivos a los empleados para que los desechos se reduzcan. Por lo tanto, el público a quien va dirigido un programa de P+L es muy amplio y debe adaptar su mensaje y sus consejos de acuerdo al público o acontecimiento en particular que esté siendo estudiado, lo cual implica que las P+L involucran la aplicación del conocimiento, el mejoramiento de las tecnologías y, sobre todo, el cambio de actitudes en muchos lugares.

Entonces, resulta evidente la necesidad de introducir el concepto, principios y métodos de las P+L en los planes de estudio de la Educación Ambiental Superior, pues el trabajo de los graduados universitarios tiene una fuerte influencia en la introducción del concepto de las P+L en el sector de producción y servicios para lograr, o no, un desarrollo verdaderamente sustentable.

## Desarrollo

Aquí se presentan los resultados de trabajos realizados para la introducción de los principios y métodos de las P+L en varias industrias que desarrollan sus actividades sobre la base de antiguos conocimientos, algunos de ellos milenarios, sin recurrir a la introducción de novedoso equipamiento o nuevas tecnologías y sin inversión de capital.

Los trabajos realizados fueron los siguientes:

1. Reutilización de los desperdicios sólidos (filter cake) generados por el proceso de clarificación en la producción de azúcar crudo.
2. Desarrollo de un método para el control operacional de la producción de cal hidratada.
3. Revalorización de la cal hidratada y reutilización de los desperdicios generados en su producción.
4. Desarrollo de un método para el control operacional de la torrefacción de café.

A continuación, los resultados obtenidos en dichos trabajos:

### **1. Reutilización de los desperdicios sólidos (filter cake) generados por el proceso de clarificación en la producción de azúcar crudo.**

Actualmente el filter cake solo tiene tres destinos finales en el mundo:

- Producción de biogás
- Producción de fertilizantes, ya sea mediante vertimiento directo en los campos o mediante la preparación previa de compost.
- Simplemente vertidos en tierras o aguas sin ninguna idea de aprovecharlos.

En cualquiera de los tres casos suceden invariablemente dos cosas:

- Hay que transportar el filter cake desde la fábrica de azúcar hasta el lugar de vertido final, lo cual implica impacto económico por los costos de transportación, e impacto ambiental por el consumo y combustión del combustible de los vehículos utilizados para el transporte.
- La descomposición de la materia orgánica acompañante implica impacto ambiental, porque los lixiviados ácidos que generan dañan sensiblemente las tierras o las aguas donde estos son vertidos.

La solución propuesta para resolver tales inconvenientes fue mezclar el filter cake con el bagazo producido, y utilizar esa mezcla como combustible en los hornos de la propia industria. Se realizaron los correspondientes balances energéticos y de masa, así como los requeridos análisis químicos y físicos que sustentan los resultados obtenidos. Las ventajas de esta solución son las siguientes:

- Eliminación de los impactos económicos y ambientales asociados a la transportación del filter cake.
- Eliminación de los impactos ambientales asociados a la generación de lixiviados ácidos por la descomposición de la materia orgánica del filter cake.
- Reducción del impacto económico asociado a la no utilización en la industria del combustible sustituido por filter cake.
- Al quemarse en los hornos la materia orgánica del filter cake, la ceniza que queda representa una reducción sensible de la masa y volumen del correspondiente filter cake; no genera lixiviados ácidos; no incorpora otras sustancias que no están originalmente presentes en la caña de azúcar, y, además, es extraída de la fábrica como una muy pequeña parte integrante de las cenizas de los hornos.

Los detalles de este trabajo aparecen en:

Waste Biomass Valorization, "Residue from Sugarcane Juice Filtration (Filter Cake): Energy Use at the Sugar Factory", Ed. Springer, Published online: 10 October 2010.

## **2. Desarrollo de un método para el control operacional de la producción de cal hidratada.**

Actualmente en el mundo el control operacional de la producción de cal hidratada se realiza, en mejor de los casos, utilizando medios de medición y equipos automáticos que regulan la operación de las etapas solo a partir de las lecturas de los instrumentos instalados.

Sin embargo, no existe actualmente ningún equipamiento que pueda ofrecer datos sobre la eficiencia de cada etapa del proceso, ya que esta depende no solo de los valores de uno o varios parámetros de operación, sino de las relaciones entre dichos valores, las características químico-físicas tanto de la materia prima como del combustible, y la relación entre dichos parámetros de operación y esas características químico-físicas.

La producción de cal hidratada presenta las siguientes características:

- Tanto el combustible como las rocas calizas consumidas para la producción de cal hidratada son recursos no renovables.
- El proceso de calcinación de calizas en los hornos requiere de elevadas temperaturas, por lo que demanda elevados consumos de combustibles.

- Los desperdicios generados en el proceso no tienen aplicación práctica alguna que permita su reutilización.
- La instrumentación y los equipos automáticos actualmente utilizados para el control del proceso son costosos y no dan información alguna sobre las eficiencias de las etapas del proceso.

En este trabajo se presenta un enfoque de P+L en la gestión de una mediana fábrica de cal hidratada encaminado al mejoramiento del consumo de combustible y de rocas calizas, la materia prima de tal producción.

Para cumplir tales objetivos se desarrollaron las correspondientes ecuaciones para poder evaluar la eficiencia de cada una de las etapas que componen el proceso. Posteriormente se realizó la correspondiente modelación y simulación matemática para poder encontrar las relaciones entre los valores de las eficiencias de cada etapa y las dependencias de estas en relación con los valores de los correspondientes parámetros de operación para poder optimizar el proceso.

A partir de los resultados obtenidos se diseñó un método para el control operacional del proceso, cuya utilización en la industria permitió obtener, sin realizar ninguna inversión, los siguientes resultados:

- Aumentar la producción en 2,84 t cal hidratada/día.
- Aumentar el % CaO aprovechable en la cal hidratada envasada en 2,63 %.
- Reducir el % de CaO aprovechable en los desperdicios en 10,87 %.
- Reducir el consumo de combustible en 1683,69 litros/día.
- Reducir las emisiones de 1,50 t CO<sub>2</sub> / t Ca(OH)<sub>2</sub> a 1,19 t CO<sub>2</sub> / t Ca(OH)<sub>2</sub>.
- Reducir los costos de las rocas calizas entradas al proceso en \$1,96 /m<sup>3</sup>
- Reducir los costos del combustible en \$0,22/l
- Hacer más estable diariamente la producción de cal hidratada y el consumo de combustible.

Los detalles de este trabajo aparecen en:

Journal of Cleaner Productions, "Cleaner production in a small lime factory by means of process control", Available online 8 April 2010, Ed. ELSEVIER.

### **3. Revalorización de la cal hidratada y reutilización de los desperdicios generados en su producción.**

Este trabajo trata sobre la utilización de diversos materiales puzolánicos en combinación con cal para la obtención de materiales aglomerantes que sustituyen con éxito al cemento Portland en la preparación de morteros para albañilería.

Este trabajo está sustentado en cinco hechos:

- El cemento Portland es más agresivo al medio ambiente, tanto por las externalidades como por las internalidades asociadas con su obtención y utilización, que los aglomerantes obtenidos a base de cal y puzolanas.
- La producción de cemento Portland es económicamente más costosa que la de los aglomerantes obtenidos a base de cal y puzolanas.
- La disposición final de materiales obtenidos en las demoliciones, como los ladrillos y tejas, provocan impactos ambientales y paisajísticos.
- El cemento Portland es insustituible donde existen requerimientos estructurales, pero el mayor consumo de morteros para albañilería en la construcción está en los trabajos sin dichos requerimientos.
- El cemento Portland se patentó en 1819, por lo que este material no formó parte de los aglomerantes utilizados en ninguna de las

construcciones anteriores a dicha fecha, ni tampoco en muchas posteriores.

Aun en la actualidad existen muy bien conservados verdaderos monumentos de la ingeniería como:

- El acueducto de Segovia, España, el cual tiene alrededor de 2000 años de antigüedad y fue declarado Patrimonio de la Humanidad.
- Los puentes sobre el río Artibai, en la ciudad de Ondarroa, País Vasco, España, los cuales aun actualmente son utilizados a pesar de estar sumergidos sus pilares en aguas agresivas, de salinidad y pH cambiantes

De estas dos obras resulta de interés para este trabajo el aglomerante utilizado en el canal de conducción del agua en el acueducto de Segovia y en los pilares del puente de Ondarroa, pues aparte de la más que comprobada resistencia al paso del tiempo, es muy destacado el hecho de la resistencia a medios acuosos agresivos, y la impermeabilización que se logra con el empleo de tales morteros (opus signium).

Entonces, el trabajo desarrolló en tres etapas, tal como se muestra a continuación:

**Primera Etapa:** Comprobación de las propiedades puzolánicas de diferentes materiales mezclándolos con cal hidratada o con desperdicios de una fábrica de cal, para obtener aglomerantes. Estos desperdicios contienen CaO, por lo que es necesario hidratarlos antes de mezclarlos con las puzolanas. La proporción de las mezclas cal + puzolanas fue en todos los casos de 25+75, pues esta proporción es la que más aparece referenciada en la bibliografía consultada.

**Segunda Etapa:** Se tomaron los materiales puzolánicos (Tufita Soledad, Toba Carolina, Ladrillos Molidos) que mejores resultados presentaron en la etapa anterior, y se varió entonces la proporción de cal hidratada de modo que pudiera precisarse la relación cal + puzolana que presentara mayor resistencia a compresión.

Tanto en esta etapa como en la anterior, la relación agua / aglomerante utilizada en cada caso fue la que mediante simple apreciación práctica permitiera una adecuada laborabilidad de las muestras.

**Tercera Etapa:** Se tomaron las proporciones cal + puzolana que arrojaron los mejores resultados en los ensayos de resistencia a compresión en la etapa anterior y se varió la relación agua / aglomerante para precisar cual maximizaba el valor de la resistencia a compresión. En la literatura consultada hasta el momento, no se han encontrado referencias que recomienden valores de tal relación que maximicen la resistencia a compresión de las muestras obtenidas.

Tanto los análisis físico-químicos de los materiales utilizados, como la conformación, tratamiento y ensayos de resistencia a compresión de las muestras obtenidas en las tres etapas, se realizó siguiendo en todos los casos las correspondientes normas ASTM, excepto en el uso de cemento Portland como aglomerante. Se determinaron las propiedades puzolánicas de los materiales utilizados mediante el método de Frattini. Los resultados obtenidos se muestran a continuación:

<b>Cal + Tufita (<math>X_4+Y_4</math>); Aglomerante + Arena (1:3)</b>	
<b>a/agl</b>	<b>Resist. a Compresión (MPa)</b>
<b>Z<sub>1</sub></b>	<b>5,78</b>
<b>Z<sub>2</sub></b>	<b>6,27</b>
<b>Z<sub>3</sub></b>	<b>5,58</b>

<b>Cal + Toba (<math>X_4+Y_4</math>); Aglomerante + Arena (1:3)</b>	
<b>a/agl</b>	<b>Resist. a Compresión (MPa)</b>
<b>Z<sub>1</sub></b>	<b>5,58</b>
<b>Z<sub>2</sub></b>	<b>6,27</b>
<b>Z<sub>3</sub></b>	<b>4,90</b>

<b>Desp.Hid.+Tufita (<math>X_4+Y_4</math>); Aglomerante + Arena (1:3)</b>	
<b>a/agl</b>	<b>Resist. a Compresión (MPa)</b>
<b>Z<sub>1</sub></b>	<b>3,62</b>
<b>Z<sub>2</sub></b>	<b>4,11</b>
<b>Z<sub>3</sub></b>	<b>3,92</b>

<b>Desp.Hid.+Tufita (<math>X_4+Y_4</math>); Sin Arena</b>	
<b>a/agl</b>	<b>Resist. a Compresión (MPa)</b>
<b>Z<sub>1</sub></b>	<b>5,58</b>
<b>Z<sub>2</sub></b>	<b>6,17</b>
<b>Z<sub>3</sub></b>	<b>5,88</b>

<b>Cal + Lad.Mol. (<math>X_4+Y_4</math>); Aglomerante + Arena (1:3)</b>	
<b>a/agl</b>	<b>Resist. a Compresión (MPa)</b>
<b>Z<sub>1</sub></b>	<b>3,23</b>
<b>Z<sub>2</sub></b>	<b>3,72</b>
<b>Z<sub>3</sub></b>	<b>3,43</b>

#### Resumen de la Norma Cubana para morteros de albañilería NC-175-2002:

<b>Tipo de mortero</b>	<b>Resist. a Compresión a 28 días (MPa)</b>	<b>Utilización</b>	<b>Mortero a utilizar (valor mínimo)</b>	
			<b>Recomendado</b>	<b>Alternativo</b>
<b>I</b>	<b>2,4</b>	• Muro no portante	<b>I</b>	<b>II – III</b>
<b>II</b>	<b>3,5</b>			
<b>III</b>	<b>5,2</b>	• Muro portante • Antepecho	<b>III</b>	<b>IV - V</b>
<b>IV</b>	<b>8,9</b>			
<b>V</b>	<b>12,4</b>	• Muro de fundición • Muro de contención • Pavimentos • Caminos • Patios	<b>V</b>	<b>IV - V</b>

Al comparar con la Norma Cubana para morteros de albañilería NC-175-2002 los resultados obtenidos de la resistencia a compresión de morteros para albañilería utilizando aglomerantes cal/puzolanas y desperdicios hidratados/tufita, en lugar de cemento Portland, se aprecia que excepto para requerimientos estructurales o de resistencia a la abrasión, estos morteros sustituyen perfectamente al cemento Portland en tres de los cinco grupos de morteros definidos en dicha Norma.

Los resultados obtenidos, sin realizar ninguna inversión, muestran que es posible:

- Reducir el impacto ambiental asociado a la producción y utilización exclusiva del cemento Portland como aglomerante en las construcciones.
- Reducir los costos relacionados con la producción de cemento Portland.
- Reducir, o aun eliminar, el impacto ambiental provocado por la disposición final de tejas y ladrillos provenientes de demoliciones.
- Reducir los costos relacionados con las construcciones.
- Garantizar una durabilidad de las obras en que se utilicen estos aglomerantes que aun el cemento Portland no ha probado, aparte de la probada resistencia que presentan en medios acuosos agresivos.

Este trabajo aun no ha concluido, pues se sigue trabajando en otras posibles variantes.

#### **4. Desarrollo de un método para el control operacional de la torrefacción de café.**

Este trabajo se desarrolló en una pequeña torrefactora de café fundada en 1925, la cual actualmente utiliza el mismo equipamiento con que fue fundada y prácticamente carece de equipos de medición. Los métodos de trabajo y de control del proceso están basados en la experiencia de los operadores transmitida entre generaciones, lo cual hace que la torrefacción de café en esta planta sea más un arte que una tecnología.

La esencia de ese arte radica en que la calidad del café tostado depende de la apreciación que los operadores de las tostadoras hagan de la coloración adquirida por el café durante el proceso. Pero esto nada tiene que ver con la eficiencia energética o material del proceso, lo cual si tiene una decisiva influencia tanto en los costos de producción, como en los impactos socio-ambientales que causan las emisiones a la atmósfera de los gases y material particulado generados en las torrefactoras de café, pues este tipo de industria está regularmente ubicada dentro de perímetros urbanos habitados.

Para enfrentar los problemas brevemente descritos anteriormente, en el mundo se han desarrollado equipos tecnológicos, medios de medición, equipos para el control automático del proceso, incineradores de gases y material particulado (café tostado y molido), etc., los cuales son costosos y no están al alcance de torrefactoras similares para sustituir sus obsoletos equipos.

Por otra parte, los consumidores de café identifican sus preferencias con determinadas marcas, precisamente porque la experiencia adquirida por los operadores durante muchos años les permite una producción con una calidad estable y consistente tal que es propia de cada marca, lo cual se perdería si se cambia la tecnología existente.

Todo lo anterior se resume de la manera siguiente:

- No existencia de capital para financiar una inversión en nuevos equipos para sustituir los instalados ya obsoletos. Además, la instalación de una nueva tecnología causaría el correspondiente impacto sobre la reconocida calidad tradicional del café envasado en esta planta.

- No existencia de algún método con bases científicas que permita tomar con racionalidad decisiones operacionales en el proceso.
- Impacto socio-ambiental y económico provocado por las emisiones a la atmósfera de gases y material particulado.

Las restricciones descritas hicieron realmente difícil mejorar el desempeño operacional de la planta, porque bajo estas condiciones no es posible conocer el balance material y/o térmico de las correspondientes etapas del proceso. Entonces, solo fue posible desarrollar los balances globales de masa y energía de toda la planta. Posteriormente se realizó la correspondiente modelación y simulación matemática para poder encontrar las relaciones entre los valores de las eficiencias material y térmica y las dependencias de estas en relación con los valores de los correspondientes parámetros de operación para poder ejercer un control operacional sobre el proceso.

A partir del conocimiento alcanzado se diseñó un método para el control operacional del proceso, cuya utilización en la industria permitió mejorar indicadores tales como el Índice de Consumo (**I.C.** = t café entradas al proceso / t café tostado envasado) y la Eficiencia Térmica del Proceso ( $\eta_T$  = cantidad de calor aprovechado / cantidad total de calor suministrado). Los resultados obtenidos al aplicar el método de control operacional desarrollado, sin realizar ninguna inversión, se muestran a continuación:

<b>Año</b>	<b>I.C.</b>	<b><math>\eta_T</math></b>
<b>2009</b>	<b>1,296</b>	<b>33,49</b>
<b>2010</b>	<b>1,238</b>	<b>39,40</b>

La reducción del Índice de Consumo y el aumento de la Eficiencia Térmica condujeron a:

- Reducir el impacto socio-ambiental provocado por las emisiones a la atmósfera de gases y material particulado (café tostado y molido).
- Reducir el impacto económico asociado a las pérdidas de combustible y a las emisiones a la atmósfera de material particulado (café tostado y molido).
- El café producido en esta planta mantuvo la calidad históricamente reconocida por los consumidores.

## 5. Conclusiones

1. Los casos anteriores son solo una muestra más del papel que desempeñan las P+L para convertir en realidad la concepción del desarrollo sustentable, al ser un elemento clave en la reducción de los impactos socio-ambientales provocados por el sector de producción y servicios y en mejorar, a la vez, su desempeño económico.
2. Los casos anteriores también son solo una muestra más de que el conocimiento y la ciencia son imprescindibles para aportar soluciones conducentes a lograr convertir en realidad la concepción del desarrollo sustentable, por lo que resulta imprescindible la inclusión de los principios y métodos de las P+L en la Educación Ambiental Superior.