

Innovaciencia

Facultad de Ciencias Físicas, Exactas y Naturales - UDES

Año 2. Volumen 2. Número 2. Enero - Diciembre 2014. ISSN: 2346-075X

The central image features a person in a dark suit standing with their back to the camera, looking at a large circular screen. The screen displays complex mathematical formulas, including terms like $w^2 Li_2 \left(\exp \left(\frac{8\pi M k_B (r_+^4 - Q^4)}{r_+^4} \right) \right)$, $2r_+^2 w Li_3 \left(\exp \left(\frac{8\pi M k_B (r_+^4 - Q^4)}{r_+^4} \right) \right)$, and $64\pi^2 M^2 k_B^2 (r_+^4 - Q^4)^2$. The background is a blue-toned collage of technical diagrams, code snippets, and data charts.



Universidad de Santander
Resolución MinEducación No. 6216 - 22/12/05
UDES

EDITORIAL

IMPORTANCIA DE LA MATEMÁTICA Y LA ESTADÍSTICA EN LA EDUCACIÓN DE LOS PUEBLOS

El bienestar de los pueblos depende en gran parte de las políticas públicas que los gobiernos puedan implementar, con el objeto de generar condiciones propicias para alcanzar el verdadero desarrollo socioeconómico, reduciendo las desigualdades que ineludiblemente surgen en el seno de las poblaciones.

Uno de los aspectos fundamentales para alcanzar este bienestar es el pilar de la educación en su sentido más amplio. Colombia se ha impuesto la tarea de mejorar paulatinamente la calidad de su educación a todo nivel y ampliar la cobertura de la misma a nivel universitario, ello implica incorporar cada vez más profesores con preparación de cuarto nivel, para lo que se hace imperativo elevar las condiciones de bienestar universitario, las que a su vez se van a reflejar en una calidad docente e investigativa superior, y de la que, el principal beneficiario va a ser el estudiantado. Las instituciones deben preocuparse por garantizar las condiciones mínimas para favorecer estas iniciativas. El programa de repatriación de profesores es un gran paso en esa dirección.

Un resultado positivo de este proceso son las investigaciones de calidad que poco a poco van alimentando publicaciones y revistas académicas, como Innovaciencia, cuyas páginas dan cabida a artículos procedentes de investigaciones en ciencias básicas. La facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales de la Universidad de Santander, específicamente en las áreas de Matemática y Estadística, dedica parte de sus esfuerzos al estudio de la calidad del proceso de enseñanza-aprendizaje, a través del análisis de estadísticas oficiales proporcionadas por el Ministerio de Educación y el Instituto Colombiano para la Evaluación de la Educación (ICFES).

Al respecto, este número incluye dos artículos en esa dirección: uno de los artículos investiga los factores asociados al rendimiento en las pruebas saber pro para los estudiantes colombianos de ingeniería civil, mediante el uso de análisis de correspondencias; el otro artículo analiza y mide la calidad de las universidades colombianas utilizando para ello modelos multivariados de ecuaciones estructurales. En ese mismo orden de ideas, un grupo de profesores de Estadística está dedicado al estudio del efecto que factores socioeconómicos pueden tener sobre el rendimiento académico de los universitarios colombianos, con base en los resultados de las pruebas Saber Pro 2010-2013; esto con el fin de conocer los factores relevantes que influyen en el rendimiento y así ofrecer alternativas en la toma de decisiones que permitan elevar los estándares educativos.

La investigación transita por los senderos del saber y se materializa en publicaciones que alimentan el bagaje cognitivo del medio que rodea a la comunidad científica. De allí la importancia de fortalecer el binomio docencia-investigación. Es de esperar que todos estos esfuerzos se sigan materializando y se divulguen a través de los diferentes medios de socialización. Que muy pronto la Revista Innovaciencia, que hoy alcanza su segunda edición, pueda convertirse en una referencia para investigadores de toda la región, el país e incluso más allá de sus fronteras.

Prof. GIAMPAOLO ORLANDONI MERLI

Innovaciencia

Revista de la Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales.

ISSN: 2346-075X

Periodicidad anual.

Publicación de carácter científico en el área de las ciencias básicas.

UNIVERSIDAD DE SANTANDER - UDES

JAIME RESTREPO CUARTAS

Rector General

CESAR AUGUSTO SERRANO NOVOA

Vicerrector de Investigaciones

ELBA VIVIANA RUEDA ORDOÑEZ

Vicerrectora de Docencia

OMAIRA NELLY BUITRAGO BOHÓRQUEZ

Vicerrectora Administrativa y Financiera

MAYRA FERNANDA VARGAS BUITRAGO

Vicerrectoría de Asuntos Estudiantiles y Egresados

JORGE ALBERTO JARAMILLO PÉREZ

Vicerrectoría de Extensión

FABIOLA CECILIA AGUILAR GALVIS

Decana Facultad de Ciencias, Exactas, Físicas y Naturales

CONTACTO DE LA REVISTA

FRANCISCO JAVIER LEÓN

Director

PBX: 6516500 Ext: 1783

Email: innovaciencia@udes.edu.co

JAIRO ENRIQUE MATEUS SÁNCHEZ

Editor

PBX: 6516500 Ext: 1783

Email: emateus@udes.edu.co

Universidad de Santander

COMITE EDITORIAL

John Jairo Castillo León

Carlos Augusto Acevedo Isidro

Christian Chacín Zambrano

Wolfgang Alexander Osma Castellanos

COMITÉ CIENTÍFICO

Jorge Alonso Cano Restrepo

Jaime Alberto Castillo León

German Zafra Sierra

Harvy Mauricio Velasco Parra

Francisco Martínez

José Félix Ortiz Lemus

PORTADA, FOTOGRAFÍA Y DISEÑO GRÁFICO

Inhouse Tecnologías – UDES

DIRECCIÓN POSTAL

REVISTA Innovaciencia

Universidad de Santander - UDES

Facultad de Ciencias Físicas, Exactas y Naturales

Campus Universitario Lagos del Cacique

Bloque Motilonés. Tercer Piso

Tel: 57-7-6516500, Ext: 1783 - 1740

TABLA DE CONTENIDO

Artículo de investigación Científica y Tecnológica

Evaluación de indicadores de gestión en las universidades públicas colombianas: una aplicación de modelos de ecuaciones estructurales

Pág.

04

Artículo de investigación Científica y Tecnológica

Factores asociados al rendimiento en las pruebas saber pro en estudiantes de ingeniería civil en universidades colombianas

17

Artículo Revisión de Tema

El polilogaritmo ayuda a corroborar la relación entre la entropía y el área de un agujero negro

25

Artículo Revisión de Tema

Control del Ácaro en la producción de jamón Ibérico

33

Artículo Revisión de Tema

Biomasa Residual Vegetal: Tecnologías de transformación y estado actual

45

Innovaciencia 2014; 2 (1): 4 - 16

EVALUACIÓN DE INDICADORES DE GESTIÓN EN LAS UNIVERSIDADES PÚBLICAS COLOMBIANAS: UNA APLICACIÓN DE MODELOS DE ECUACIONES ESTRUCTURALES

COLOMBIAN PUBLIC UNIVERSITIES MANAGEMENT INDICATORS ASSESSMENT:
A STRUCTURAL EQUATION MODEL APPLICATION

Miguel Oswaldo Perez Pulido ¹, Giampaolo Orlandoni Merli ², Josefa Ramoni Perazzi ³

Cómo citar este artículo: Pérez-Pulido MO, Orlandoni Merli G, Ramoni Perazzi J. Evaluación de indicadores de gestión en las universidades públicas colombianas: una aplicación de modelos de ecuaciones estructurales. Innovaciencia facultad ciencias exactas fis. naturales. 2014; 2(1): 4 - 16

Artículo recibido el 05 de febrero de 2014 y aceptado para publicación el junio 10 de 2014

RESUMEN

Introducción: En los últimos años, las universidades están experimentando nuevas tendencias que tienen serias implicaciones en su estructura y funcionamiento. Los organismos involucrados en la educación superior están construyendo estrategias para mejorar la eficiencia en las universidades y así asegurar su correcto funcionamiento. El Modelo de Gestión de las universidades públicas colombianas se basa en la evaluación de las relaciones de causalidad entre los insumos con los que cuenta la universidad, medidos a través de un conjunto de indicadores que representan la capacidad total de la misma. En esta investigación se presenta un análisis de los indicadores de gestión universitaria estatal en el periodo 2003-2008, donde se pretende caracterizar la evolución en el tiempo y explorar si se mantiene su estructura año a año. También se investiga si los indicadores propuestos por el SUE (Sistema Universitario Estatal) son los más aptos y se puntualiza cuáles de ellos son más confiables. **Materiales y Métodos:** Este trabajo es un estudio descriptivo y cuantitativo, en el que se propone un diseño de modelo estructural longitudinal en dos fases (two wave), dividido en dos periodos (2003-2005) y (2006-2008). Se analizaron las variaciones porcentuales de los distintos indicadores de gestión tomando como año base el 2003. Los datos se analizaron mediante el software Lisrel 8.5. **Resultados:** Dentro de los resultados más significativos se observa el cambio estructural de comportamiento favorable para el segundo periodo (2006-2008) respecto al primero (2003-2005) en el índice de investigación. **Conclusiones:** El efecto directo estimado desde el índice de investigación del periodo es de 3.8, lo que indica un cambio de estructura favorable positivo entre los dos periodos.

Palabras clave: Indicadores de gestión universitaria, Modelos de Ecuaciones Estructurales, Análisis Factorial Confirmatorio, Sistema Universitario Estatal.

1. Licenciado en Matemáticas, Magister en Estadística. Profesor Titular. Universidad de Santander, Facultad de Ciencias Exactas Físicas y Naturales, Grupo de Investigación CIBAS. Bucaramanga. Correspondencia: miguel.perez@udes.edu.co

2. Economista, PhD en Estadística. Profesor Titular. Universidad de Santander, Facultad de Ciencias Exactas Físicas y Naturales, Grupo de Investigación CIBAS. Bucaramanga. Colombia

3. Economista, PhD en Economía. Profesor Titular. Universidad de Santander, Facultad De Ciencias Económicas, Administrativas y Contables. Bucaramanga. Colombia

ABSTRACT

In recent years, universities are experimenting new trends that have serious implications for its structure and functioning. The organizations involved in higher education are building strategies to improve university efficiency and ensure their proper functioning. There are several studies regarding university evaluation using indicator systems. The management model of Colombian universities is based on the assessment of the causal relationships between university inputs, measured through a set of indicators that represent the university total capacity. This research presents an analysis of the Colombian public universities performance indicators for the period 2003-2008, which aims to characterize its evolution in time and explore whether it maintains its structure every year. We also investigate whether the indicators proposed by the SUE (State University System) are the best indicators and points out which ones are more reliable. This paper is a descriptive and quantitative study, in which we propose a structural longitudinal model in two waves divided into two time periods (2003-2005) and (2006-2008). We analyzed the percentage changes in several management indicators taking 2003 as the base year. The data were analyzed by the software Lisrel 8.5. Among the most significant results is the positive behavior change for the second period (2006-2008) compared to the first (2003-2005) in the research index.

Keywords: University management Indicators, Structural Equation Modeling, Confirmatory Factor Analysis, State University System

Código JEL: I23, C33

INTRODUCCIÓN

De acuerdo con la ley 30 de 1992, las fuentes de recursos de las universidades estatales son tres: los recursos provenientes de la nación, los recursos aportados por las entidades territoriales y los recursos propios de cada institución, los cuales se obtienen a través de venta de servicios, matrículas, derechos académicos, programas de extensión, consultorías o convenios de investigación, entre otros. En cuanto a los recursos provenientes de la nación, estos se aseguran y regulan mediante dos normatividades: los Artículos 86 y 87 de la Ley 30. El Artículo 86 garantiza a las universidades del estado unos recursos fijos que provienen de la nación y de las entidades territoriales, los cuales deben ser destinados a funcionamiento e inversión; el Artículo 87 por su parte fija el incremento anual de los recursos que aporta la nación por el artículo 86 de acuerdo con

el crecimiento de la economía y de conformidad con los objetivos previstos para el Sistema de Universidades estatales¹.

Los cambios generados a nivel económico y social han tenido en Colombia como consecuencia la exigencia de una gestión más ágil y moderna de las universidades tradicionales, en particular, las universidades públicas. Estos cambios establecen ciertos desafíos, como la necesidad de que los recursos materiales, académicos y profesionales deban ser organizados adecuadamente para el cumplimiento de la función universitaria. Bajo esta idea, se crea un ambiente positivo encaminado a evaluar el desempeño académico e investigativo, creando una sociedad innovadora y de resultados basados en los principios de eficacia, calidad y pertinencia. Tomando en consideración la importancia de la educación pública en Colombia y pensando en el mejoramiento de su calidad, el Sistema de Universidades Estatales (SUE) definió una serie de indicadores^{IV} que describen la gestión de las universidades públicas en Colombia, con el fin de conocer la eficiencia de cada una de ellas desde el punto de vista académico-investigativo.

Como contribución a esta situación, el presente artículo pretende, con base en la importancia del desempeño de gestión universitaria, analizar el comportamiento de los indicadores en el periodo 2003-2008, estando a la expectativa de encontrar diferencias entre los distintos grupos (2003-2005 y 2006-2008), debido a que las universidades están en un proceso de mejoramiento en su rendimiento. De la misma manera, se espera que los últimos años las universidades tengan un crecimiento significativo e importante respecto a los primeros, y que existan relaciones entre indicadores de diferentes índices. Esto llevará de alguna manera, a que las universidades en mira de ser acreditadas planifiquen y mejoren su desempeño misional. Ante esta situación, surge la necesidad de responder a interrogantes como: ¿Los indicadores seleccionados por el SUE son los más aptos? ¿Se mantiene la estructura de los indicadores año a año? ¿Cuáles son los indicadores más confiables en los distintos periodos de tiempo?

Indicadores de gestión universitaria

El objetivo general del Modelo de Indicadores de Gestión es estimular el mejoramiento del Sistema Universitario Estatal en su conjunto, a través del seguimiento a la gestión en los componentes inherentes a las universidades, en un enfoque de equidad y heterogeneidad².

Se trata de un instrumento que combina el análisis y procesamiento de datos en un modelo técnico que provee unos indicadores claros, los cuales permiten a la sociedad enterarse de cómo las universidades estatales producen

IV. Se entiende por indicador a la expresión cuantitativa o cualitativa que permite describir características, comportamientos o fenómenos de la realidad, en un momento determinado. Se habla de variables o indicadores, porque si bien algunos de los resultados de la universidad pueden representarse a través de variables como el número de alumnos matriculados, otros resultados son el producto de la combinación de variables que resultan en la construcción de indicadores. Adicionalmente, el conjunto de las variables o indicadores utilizados producen los índices de capacidad y de resultados. (Ministerio de Educación Nacional (MEN), 2010).

resultados concretos. Estos indicadores están distribuidos en cuatro grandes áreas: Formación, Producción Académica, Bienestar Universitario y Extensión, las cuales son entendidas como las principales áreas misionales de cualquier Institución de Educación Superior (IES). Éstas son evaluadas a partir de la capacidad inicial que posee cada institución, entendida como la combinación de recursos ó insumos con que cuenta la IES para la obtención de sus resultados misionales. A continuación se describen los indicadores de capacidad, investigación, formación, que son los de interés en el presente estudio.

- **Capacidad:** se describen los indicadores que componen los llamados recursos humanos (número de docentes en tiempos completos equivalentes, incluyendo catedráticos y ocasionales, discriminados por niveles de formación); los recursos financieros (recursos financieros provenientes del Estado y generados por la universidad en desarrollo de su actividad, causados en el año respectivo; los recursos físicos (área de los espacios físicos construidos disponibles para las actividades universitarias misionales y de apoyo administrativo).

- **Formación:** esta variable indica los resultados de una universidad en lo referente a la creación, desarrollo y acreditación de programas académicos en pregrado y postgrado, incorporación y seguimiento de estudiantes matriculados, número de estudiantes graduados y número de estudiantes que obtuvieron un puntaje superior al 75% en las pruebas Saber Pro^V.

- **Investigación:** variable que mide la actividad universitaria en investigación, a través del número de revistas indexadas publicadas por la Institución, los artículos de sus miembros y docentes publicados en revistas indexadas, la creación y sostenimiento de grupos de investigación reconocidos por Colciencias, investigadores y grupos, movilidad de docentes, productos audiovisuales cinematográficos o fonográficos, empresas de innovación y/o creadas a partir de la investigación y la producción de patentes.

Dentro del modelo se encuentran indicadores como bienestar y extensión que no fueron tomados en cuenta para el presente estudio. Es necesario aclarar que se excluyeron algunos indicadores por la poca confianza que se tiene sobre la veracidad de la información suministrada, ya que algunos de ellos son indicadores recién introducidos en el sistema y muchas universidades no contaban con la información claramente definida; otros indicadores no se consideraron por la poca relevancia de su información. Los análisis presentados en el presente trabajo se llevaron a cabo utilizando el lenguaje de procesamiento estadístico Lisrel 8.5 (Linear Structural

Relations), utilizando adaptaciones de rutinas de los manuales del Lisrel propuestos por Joreskög y Sorböm.

Proceso de creación de indicadores

Los indicadores de gestión universitaria colombiana se revisan y se mejoran cada año por grupos de expertos apoyados por tendencias actuales, proponiendo un mejoramiento y fortalecimiento en su función. Cada propuesta fue socializada y revisada por representantes de dos universidades públicas que fueran viables para su construcción. De esta manera, se construyeron 29 indicadores (para el año 2009 son 36, y para el 2010 son 31), en los que se elaboraron protocolos^{VI} de información que facilitaron la recolección de la información.

Una vez recolectada la información, se revisan y se validan por medio de técnicas estadísticas. Cada año se evalúa el desempeño de los indicadores agregando u omitiendo algún criterio en común acuerdo, teniendo en cuenta el aporte significativo a los objetivos del sistema. Su análisis se tiene en cuenta en el año inmediatamente anterior (estático) y el componente dinámico (su evolución desde el 2003 que se crearon los indicadores de gestión).

El primer paso para su construcción consiste en el cálculo de los índices de resultados y de capacidad a partir de los cuales se medirá la gestión de cada universidad. La técnica estadística utilizada para la construcción de los índices es la de análisis multivariante, a partir de la cual se busca explicar el total del sistema (en este caso el total de resultados o de la capacidad) a través de un número menor de variables, denominadas factores o componentes.

Con base en los índices calculados, el modelo define una curva o frontera que establece el techo que en términos de resultados alcanzan las universidades y suministra la distancia que respecto a ese techo tienen cada una de ellas. Esa distancia es una medida de la eficiencia técnica de la universidad. Ninguna universidad puede tener una relación mayor que 1. Suponer que la frontera de producción tiene un carácter aleatorio, implica que aún cuando una universidad realice sus procesos de forma eficiente hay factores que no están bajo su control y que pueden hacer que el nivel de los resultados obtenidos varíe.

Estos aspectos se recogen en una perturbación aleatoria, que puede ser positiva o negativa, reflejando influencias favorables en el primer caso, e influencias adversas en el segundo. Un modelo estocástico de frontera de producción para el total del sistema compara los resultados estimados del mejor resultado esperado de acuerdo a los insumos (capacidad) de la universidad comparado con los resultados esperados, así la Eficiencia Técnica (ET) será la división de este resultado observado

V. Son un instrumento estandarizado para la evaluación externa de la calidad de la Educación Superior para estudiantes de último semestre. Forma parte, con otros procesos y acciones, de un conjunto de instrumentos que el Gobierno Nacional dispone para evaluar la calidad del servicio público educativo y ejercer su inspección y vigilancia (Ley 1324 de 2009)

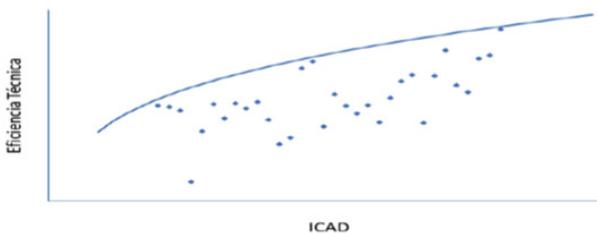
VI. Son lineamientos enviados a cada institución educativa para la recolección de la información. Al recolectar la información, son enviados al MEN para su respectivo análisis.

y el esperado (producto de un modelo estadístico) bajo el supuesto de perfecta eficiencia².

$$ET = (\text{Resultado observado}) / (\text{Resultado esperado en el escenario perfecto de eficiencia})$$

Al tratarse de un valor relativo (un porcentaje de eficiencia), es posible comparar a instituciones de diferentes tamaños en un mismo escenario. De esta forma IES de capacidad grande (parte derecha de la Figura 1) y de capacidad pequeña (parte izquierda de la Figura 1) pueden tener resultados en eficiencia similares o iguales. Por ejemplo en color azul claro se tienen universidades cercanas a la línea de frontera, estando en lugares opuestos según el tamaño de su capacidad.

Figura 1. Modelo de frontera estocástica para las IES
Fuente: MEN (2012)



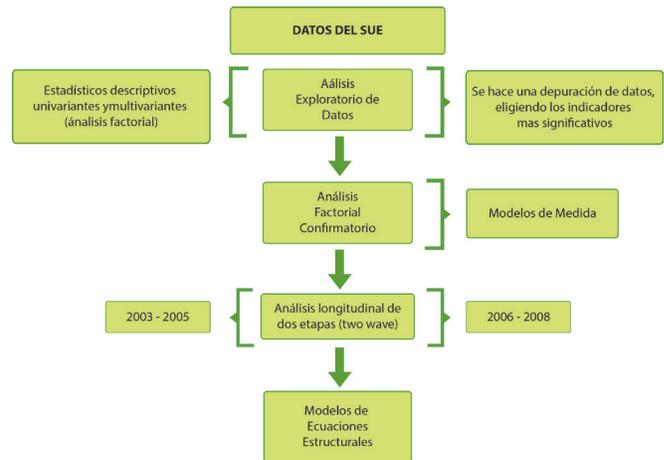
La suma de los dos modelos el estático y el dinámico refleja la eficiencia tanto de la vigencia del año actual como la evaluación que cada una de las IES ha tenido en el sistema. Dentro de los estudios sobre la construcción de indicadores de las universidades estatales se puede ampliar información en las investigaciones de los autores citados³⁻⁸.

Materiales y Métodos

Se plantea la metodología como una fusión de técnicas y enfoques, asociada a la creación de los modelos estructurales. Incluye entre otras cosas, análisis exploratorio de datos, con la finalidad de retener indicadores representativos en cada periodo de tiempo y descartar aquellos que estadísticamente sean redundantes⁹. A continuación se describe la estructura metodológica usada para alcanzar los objetivos planteados en este trabajo de investigación. En la Figura 2 se muestra un diagrama de flujo del procedimiento.

Con el propósito de caracterizar y evaluar cada índice, se analizaron los indicadores de manera global, desde los años 2003 hasta el 2008. Esto permite saber cuales tienen mayor aporte al sistema de gestión universitaria conociendo a fondo su comportamiento respecto de cada índice. En un primer acercamiento a los modelos de medida, se tomaron en cuenta los indicadores de capacidad, formación e investigación que el Sistema Universitario Estatal (SUE) sugiere para la evaluación de las universidades (ver Tabla

Figura 2. Esquema general de la metodología del análisis estructural de los indicadores de gestión



1), exceptuando algunos que por irregularidades en sus medidas (datos faltantes, ceros, entre otros) no fueron tomados en cuenta (bienestar y extensión). Posteriormente se plantearon modelos estructurales completos que permitieran tomar en cuenta posibles cambios estructurales en los dos periodos de tiempo definidos, y resaltaran su importancia en la construcción del Sistema Universitario Estatal. Finalmente se evaluaron los modelos a través de los índices de ajuste de los modelos estructurales.

El análisis estadístico de los datos recopilados se hizo mediante análisis descriptivos multivariantes, modelos factoriales confirmatorios y modelos de ecuaciones estructurales longitudinales de dos etapas.

Tabla 1. Indicadores de gestión universitaria estudiados

INDICE	INDICADOR	ABREVIATURA
Formación	Matricula de pregrado	MATPRE
	Matricula de posgrado	MATPOS
	Estudiante Recién ingreso	PRIM
	Graduados de posgrado	GRADPRE
	Programas de pregrado	PROPRE
Capacidad	Metros cuadrados	METR
	Docentes	DOCEN
	Recursos financieros	RECFIN
	Gastos administrativos	ADMIN
Investigación	Ponencias	PON
	Graduados maestría y Doctorados	GRADMD
	Artículos	ART
	Revistas	REV
	Grupos de investigación	GROUP

Modelo de Ecuaciones Estructurales LISREL

Se define el modelo LISREL: “como un modelo general que estima los coeficientes desconocidos de un conjunto de ecuaciones estructurales lineales”¹⁰. Se definen los modelos estructurales como “ecuaciones de regresión con supuestos menos restrictivos, que permiten errores de medida tanto en las variables criterio (independientes) como en las variables dependientes. Consiste en análisis factoriales que permiten efectos directos e indirectos entre los factores. Habitualmente incluyen múltiples indicadores y variables latentes”¹¹. De forma general, engloban y extienden los procedimientos de regresión, el análisis econométrico y el análisis factorial. Los modelos analizados por LISREL se conocen como modelos de ecuaciones estructurales (MEE). Estos modelos se caracterizan por ofrecer una visión global del fenómeno estudiado, permitiendo estimar relaciones de dependencias múltiples en un único modelo, logrando así eficiencia estadística. Tienen además la capacidad de representar conceptos no mensurables, mediante variables latentes, teniendo además en cuenta el error de medida en el proceso de estimación¹².

En los sistemas de ecuaciones analizados por los MEE se tienen dos clases de variables: las observadas directamente y las variables latentes, que representan conceptos no mensurables, que son no observables, aunque están relacionadas con las primeras. En la forma más general el modelo asume que existe relación causal entre las variables latentes y éstas aparecen como causas fundamentales de las variables observadas.

Los modelos de ecuaciones estructurales (MEE) presentan las siguientes características¹¹:

1. Permiten representar explícitamente la distinción entre variables latentes y variables observadas, lo que hace posible contrastar una amplia variedad de hipótesis a niveles más altos de abstracción.
2. Incorporan los errores de medida para las variables observadas, mejorando así la calidad de las estimaciones.
3. Engloban como casos especiales muchos procedimientos clásicos, como regresión múltiple, correlación canónica, análisis factorial, sistemas de ecuaciones simultáneas, análisis de datos tipo panel, análisis de varianza y análisis de covarianza.
4. Los MEE se componen a su vez por dos partes: el modelo estructural y los modelos de medida.

Es necesario mencionar varios problemas típicos que suelen encontrar en los modelos estructurales, algunas limitaciones que debemos tener en cuenta y las

precauciones que debemos tomar al utilizarlos. Uno de los problemas que surgen de los modelos de ecuaciones estructurales es su indeterminación. Es decir, existe un número de parámetros a estimar demasiado grande para el tamaño muestral de trabajo. Esto es debido principalmente a que las variables latentes son totalmente desconocidas e introducen una fuerte deficiencia en el modelo a la hora de medir las relaciones existentes entre ellas. El tamaño muestral para el MEE suele ser elevado, y también pueden sufrir deficiencia en la no identificación del modelo¹³. Se acostumbra en estos modelos a exigir tamaños muestrales superiores a 100 sujetos y los tamaños superiores a 200 son buena garantía. En la definición de un modelo no deben excluirse variables importantes desde el punto de vista teórico. En primer lugar, debe hacerse un esfuerzo por medir todas las variables pertinentes. En segundo lugar deben cuestionarse los modelos en los que las variables conceptualmente centrales carezcan de efecto significativo. Muchos estudios en los que se utilizan estos modelos abusan del ajuste y reajuste de las posibles relaciones teóricas, incluyendo y excluyendo efectos variables de manera tentativa¹⁴.

Modelo estructural

El modelo general en MEE lo constituyen un sistema de ecuaciones simultáneas que pueden contener variables aleatorias, parámetros estructurales y en algunos casos variables no aleatorias. Se consideran tres tipos de variables aleatorias: latentes, observadas y perturbadoras o errores. A su vez, las perturbaciones pueden ser de dos tipos conceptualmente distintos. Por un lado, los errores en las ecuaciones o perturbaciones tal cual son entendidas en modelos de regresión; es decir, un compuesto de todas las variables que pueden afectar a la variable dependiente y que no se incluyen explícitamente en el modelo y por otro lado, los errores de medida que afectan la confiabilidad de los indicadores de las variables no observadas.

La fortaleza de las relaciones causales propuestas en un modelo está recogida en los parámetros estructurales. Estos son constantes e invariantes que pueden describir la relación entre variables latentes, entre variables observadas o entre variables latentes y variables observadas. El modelo general posee dos elementos principales: *el modelo de variable latente* y *el modelo de medida*. Modificaciones a estos dos grandes componentes dan lugar a los tipos básicos de modelos estructurales: *modelo con variables observadas*, *modelo confirmatorio* y *modelo completo*.

Una potencialidad interesante de estos modelos es la posibilidad de representar el efecto causal entre sus variables. Se debe tener claro que la estimación del parámetro no “demuestra” la existencia de causalidad. La existencia de una relación causal entre las variables debe venir sustentada por la articulación teórica del modelo y no por su estimación con datos de tipo transversal. Para demostrar científicamente

la existencia de una relación causal deberemos recurrir al diseño de un experimento controlado con asignación aleatoria de los sujetos a las condiciones de estudio¹⁴. El número de ecuaciones estructurales es igual al número de variables latentes endógenas definidas en el modelo. El método LISREL estima los coeficientes desconocidos de un conjunto de ecuaciones estructurales lineales. Está diseñado particularmente para considerar modelos que incluyen variables latentes, errores de medida en las variables observables, causación recíproca, simultaneidad e interdependencia¹⁰. El modelo estructural general tiene la siguiente expresión matemática:

$$\eta = B\eta + \Gamma\xi + \zeta$$

Dónde:

$B_{m \times m}$: Matriz de coeficientes de variables latentes endógenas η

$\Gamma_{m \times m}$: Matriz coeficientes de variables latentes exógenas ξ

$\zeta_{m \times 1}$: Vector perturbaciones aleatorias

$\eta_{m \times 1}$: Variables latentes endógenas

$\xi_{m \times 1}$: Variables latentes exógenas.

Una variable es endógena cuando es explicada por otras variables en el modelo. Sin embargo, una variable endógena puede a su vez explicar a otra variable endógena. Esta es la razón por la que no se emplean los términos: variable dependiente y variable independiente¹⁵. A continuación se describen los elementos del modelo de medida y los modelos en dos etapas (Two wave).

Modelos de medida: Análisis factorial confirmatorio

Los modelos de medida especifican la relación de dependencia entre las variables latentes y las variables observables, que sirven de indicadores a dichas variables latentes. El Análisis Factorial Confirmatorio (AFC) se ha convertido en los últimos años en uno de los procedimientos de análisis más utilizados en investigación en ciencias sociales. El AFC es un procedimiento de análisis encuadrado en los modelos de ecuaciones estructurales, cuyo propósito se centra en el estudio de los modelos de medida, esto es, en analizar las relaciones entre un conjunto de indicadores o variables observables y una o más variables latentes o factores. En MEE “el análisis confirmatorio es la herramienta para evaluar la calidad individual y colectiva de los indicadores seleccionados para medir a una o varias variables latentes. Como su nombre lo indica, está orientado a confirmar la estructura sugerida por medio del modelo”¹⁶.

El modelo general para el análisis confirmatorio establece las relaciones de las variables latentes con los indicadores

múltiples¹¹. Se compone de dos modelos: un modelo para las variables endógenas y otro para las variables exógenas:

$$Y = \Lambda_y \eta + \varepsilon \quad X = \Lambda_x \xi + \delta$$

Dónde,

$Y_{p \times 1}$: Vector de respuestas observadas (endógenas)

$X_{q \times 1}$: Vector de predictores o variables observadas exógenas

$\Lambda_{y \times m}$: Matriz coeficientes de η en Y

$\Lambda_{x \times m}$: Matriz de coeficientes de ξ en X

$\varepsilon_{p \times 1}$ Vector de errores de medida en Y

$\delta_{q \times 1}$ Vector de errores de medida en X .

Para determinar si un modelo es identificable se necesitan conocer el número de parámetros libres y de variables observadas, cumpliéndose la siguiente desigualdad:

$$t < \frac{(p+q)(p+q+1)}{2}$$

Donde t es el número de parámetros libres y $p+q$ es el número de variables observadas. Esta regla es necesaria más no suficiente para garantizar la identificabilidad del modelo. Algunas otras reglas que pueden ser aplicables a un modelo de trayectorias, se pueden leer en el autor citado¹⁶.

Evaluación del modelo

Una vez que se ha estimado un modelo es necesario evaluar su calidad. Para ello se utilizan los estadísticos de bondad de ajuste. Existen tres tipos de estadísticos de bondad de ajuste: los indicadores de ajuste absoluto (valoran los residuos), los de ajuste relativo (comparan el ajuste respecto a otro modelo de peor ajuste) y los de ajuste parsimonioso (valoran el ajuste respecto al número de parámetros utilizado). Ninguno de ellos aporta toda la información necesaria para valorar el modelo y habitualmente se utiliza un conjunto de ellos del que se informa simultáneamente¹⁷. Para probar la evaluación del modelo planteado globalmente y la significación de cada uno de los parámetros, se midieron las discrepancias entre $\sum(\theta)$ y \sum a partir de sus contrapartes S , matriz de covarianzas muestrales, y $\sum(\theta)$, matriz implicada por el modelo, evaluada en los valores de θ que minimizan la función de ajuste $F(S, \sum(\theta))$. En la Tabla 2 se presentan varios indicadores usados para la evaluación del modelo.

$$corr(\eta_1, \eta_2) = \left(\frac{\varpi_{21}^2}{\varpi_{11}\varpi_{22}} \right)^{1/2} = \left[\frac{(\sigma_{32}\sigma_{41})}{(\sigma_{21}\sigma_{43})} \right]^{1/2}$$

Por tanto, el modelo puede usarse para estimar este coeficiente de correlación y probar la hipótesis de que es igual a la unidad¹⁰.

RESULTADOS

Variaciones experimentadas por los índices analizados.

Con el propósito de conocer la dinámica de los indicadores año a año, y analizar si presentaron crecimientos o decrecimientos significativos, se propone analizar la tasa de crecimiento promedio de cada año respecto al año base (2003), obteniéndose los porcentajes acumulados respecto a 2003. Su cálculo se hizo de la siguiente manera: (PROM200-PROM2003)/PROM2003. A continuación se presentan las variaciones porcentuales absolutas para cada índice.

Según la Tabla 3a, el número de grupos de investigación, no obstante estuvo congelado en los últimos tres años^{VII}, registra un aumento del 1246% al comparar el 2008 con el 2003. El número de artículos reflejó un desarrollo científico interesante con un incremento de 761%. Las patentes tuvieron un crecimiento significativo comparado con el año base 2003 de 750%, aclarando que solamente se

reportan datos de este indicador de cuatro universidades y que los valores de inicio son muy pequeños. El número de revistas es otro indicador que ha tenido una fuerte dinámica en el periodo 2003-2008, mostrando un crecimiento de 293%. El número de ponencias también experimentó un significativo crecimiento: 168%. La movilidad de docentes y graduados de maestría tuvieron los menores crecimientos comparados con los demás indicadores (73% y 33% respectivamente).

La Tabla 3b muestra que los gastos administrativos tuvieron un decrecimiento considerable en el año 2008; los demás indicadores tienen un comportamiento creciente especialmente los recursos financieros (46%). Valga la pena aclarar que los anteriores indicadores han generado informaciones a todas luces incoherentes, tales como disminuir en alta proporción los recursos girados por el estado y los gastos administrativos de un año a otro³. Los análisis aquí descritos son meramente descriptivos, con el fin de conocer el comportamiento de ellos, con la información que ha sido suministrada. Los metros cuadrados y los docentes experimentaron cambios del 23% y 29% respectivamente. En general, excepto los gastos administrativos, los demás gastos tuvieron un crecimiento en el tiempo.

De acuerdo a los indicadores de formación, (Tabla 3c) muestra el decrecimiento en el número de estudiantes con resultados meritorios en las pruebas Saber Pro (examen de egresados) por parte de todo el sistema universitario estatal (-3.5%), siendo el único indicador de formación que decreció en el periodo 2003-2008. Este decrecimiento,

Tabla 3. Variación porcentual-Índice de investigación, capacidad y formación IES colombianas.

Tabla 3a. Variación % de investigación

V% Base 2003	INVESTIGACIÓN						
	ART	REV	PATENT	GRUP	PON	MOVD	GRAD_MD
2003	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2004	2.53	0.24	0.50	0.66	0.55	-0.01	0.22
2005	3.51	0.85	2.00	4.34	0.76	0.15	0.38
2006	6.96	1.72	4.00	12.46	1.36	0.41	0.60
2007	7.68	2.12	5.00	12.46	1.69	0.68	0.82
2008	7.61	2.93	7.50	12.46	1.68	0.73	0.33

Tabla 3b. Variación % de investigación

V% Base 2003	CAPACIDAD			
	METROS	DOCENTES	ADMIN	RECFIN
2003	0.00	0.00	0.00	0.00
2004	0.02	0.07	0.13	0.11
2005	0.07	0.14	0.18	0.24
2006	0.13	0.19	0.30	0.27
2007	0.17	0.23	0.41	0.38
2008	0.23	0.29	0.32	0.46

Tabla 3c. Variación % de formación

V% Base 2003	FORMACIÓN											
	SABER	MATPR	MATPO	PROPO	PROPRE	PRIM	MATACRE	ACRE	MOVI	EXTR	GRAPRE	GRADPOS
2003	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2004	0.39	0.11	0.04	0.02	0.06	0.12	0.01	0.09	0.13	0.67	0.07	0.01
2005	0.35	0.15	0.30	0.08	0.04	0.19	0.27	0.33	1.50	1.70	0.03	-0.01
2006	0.00	0.21	0.34	0.05	0.03	0.18	0.69	0.86	2.44	2.23	-0.02	0.12
2007	0.07	0.27	0.35	0.13	0.06	0.21	1.39	1.37	2.48	3.16	0.16	0.26
2008	-0.03	0.31	0.40	0.18	0.08	0.25	1.82	1.74	3.02	4.33	0.25	0.39

VII. Las IES no registraron información en este tiempo al MEN debido a la reestructuración de las categorizaciones de los grupos por COLCIENCIAS.

podría ser originado por los cambios en las políticas de la presentación de la prueba. Un indicador que creció significativamente fue MATPO (40%) respecto al año base 2003, al igual que los GRADPOS (39%). Los PRIM y GRADPRE tuvieron crecimientos similares (25%). Los PROPO tuvieron un crecimiento muy discreto respecto al año inicial de 8%. En general, todos los indicadores han mejorado en gran manera, excepto Saber Pro.

Resultados de los modelos de ecuaciones estructurales

A continuación se presentan los resultados obtenidos a través de la estimación de los modelos estructurales sobre los indicadores de gestión universitaria. La Figura 3 muestra el modelo estructural general. Allí se observan dos grupos de variables: el primero es un grupo de medida en X, con variables exógenas y con sus respectivas variables latentes (IF1, II1, IC1)^{VIII}; el otro grupo es un modelo de medida en Y, con variables dependientes del primer grupo y con variables latentes (IF2, II2, IC2). De esta manera, se condensa en un solo análisis, fusionándose el modelo de medida (observable) y el modelo de ecuaciones lineales estructurales, generándose el modelo completo estructural.

Luego de plantear el modelo teórico y evaluar el modelo estimado mediante procedimientos de máxima verosimilitud, se obtienen diversos submodelos, teniendo en cuenta la naturaleza de causa y efecto entre ellos.

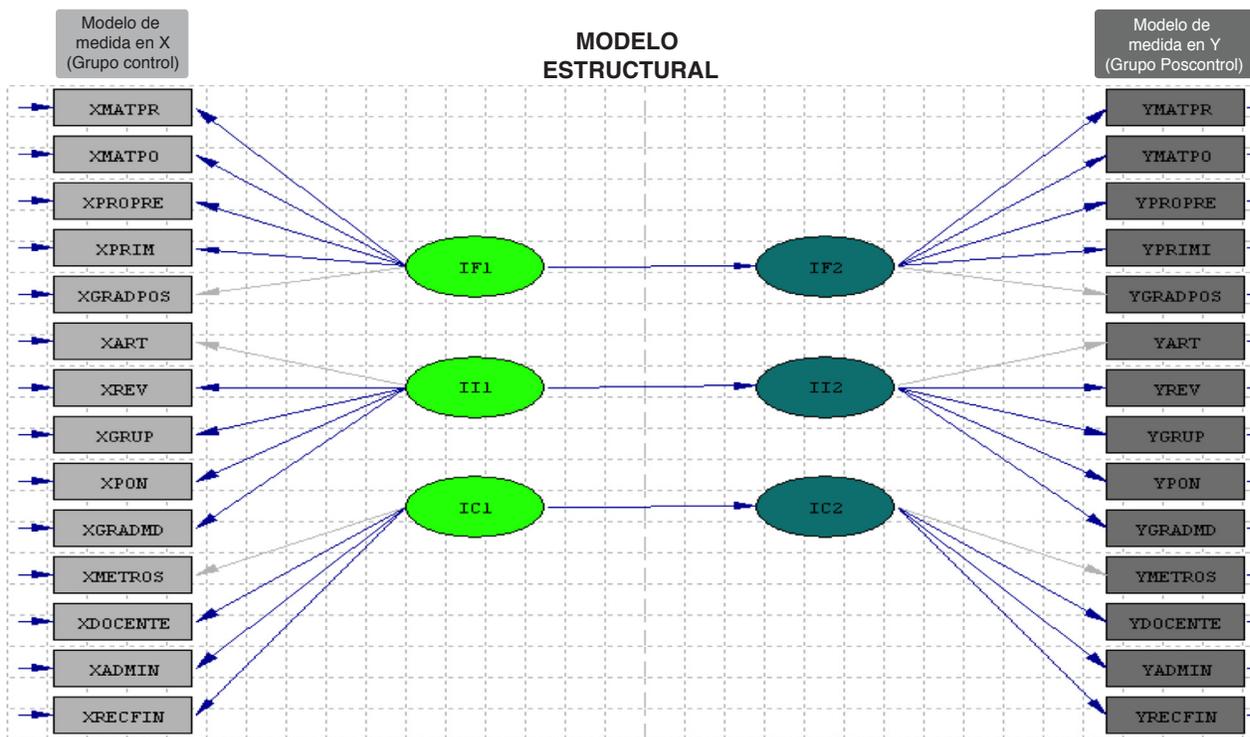
Submodelo 1

La Figura 3, muestra que las relaciones existentes entre los indicadores de cada periodo concuerdan con los resultados obtenidos en los modelos de medida y en los modelos estructurales de cada índice.

En la Figura 4 se puede ver un cambio notable en la estructura del índice de investigación (gamma=3.80), el índice de formación tuvo un cambio en su estructura (gamma=1.7), mientras que el comportamiento de capacidad no tuvo cambios significativos en su estructura (gamma=1.06) entre los dos periodos.

De igual manera, los coeficientes estandarizados muestran altos valores en cada índice. En el primer periodo se identifica los valores que cargan bajo como PATEN (0.73), ART (0.77) y GRADPOS (0.78). En el segundo periodo, los valores menores de 0.9 son: PROPRE (0.83), MATPO (0.89), PRIM (0.89). Todos los valores de *t* son altamente significativos, observándose valores más altos en los periodos en que hay un

Figura 3. Modelo estructural completo.



VIII. Refiérase a IF1 al grupo conformado por los años 2003-2005 de los indicadores de formación, a IF2 al segundo grupo 2006-2008. Con la misma idea anterior, se definen II1 (Índice de investigación primer grupo), II2 (índice de investigación segundo grupo), IC1 (Índice de Capacidad primer grupo), IC2 (Índice de capacidad segundo grupo).

Figura 4. Valores estimados-modelo estructural completo. Submodelo 1.

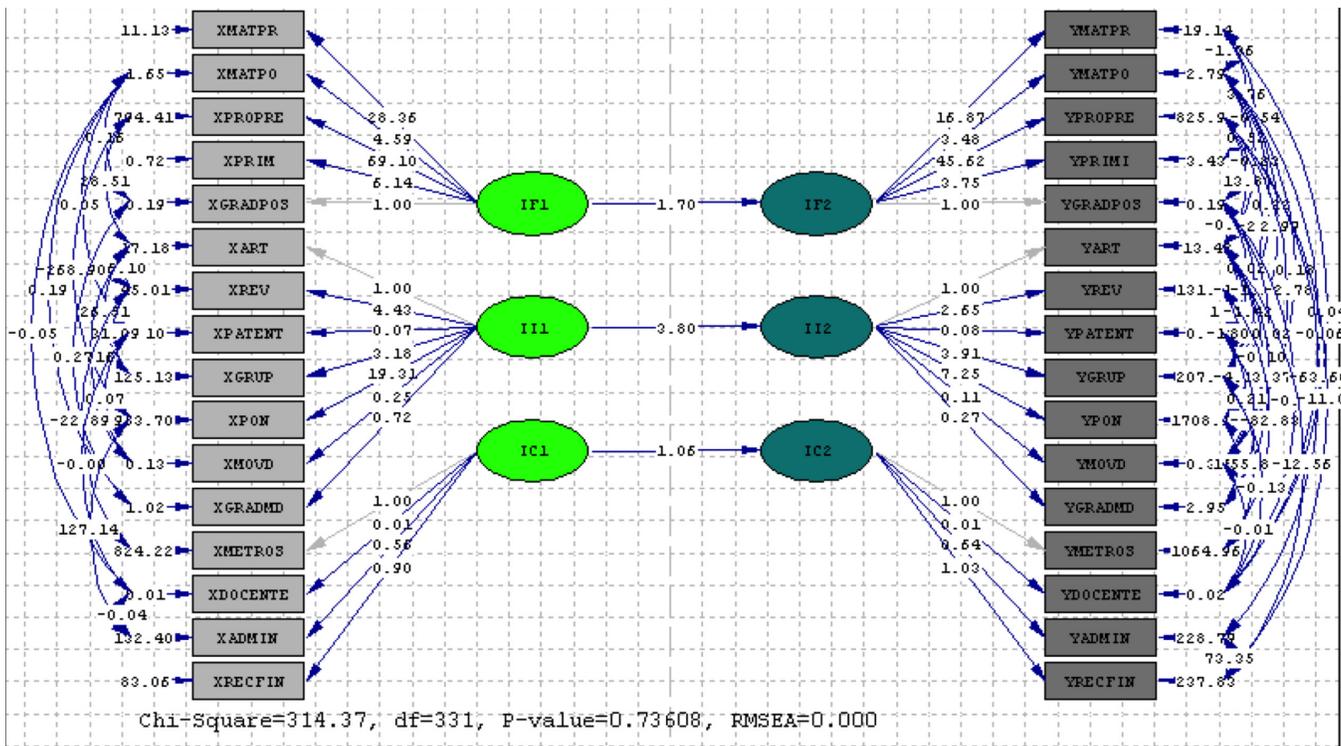
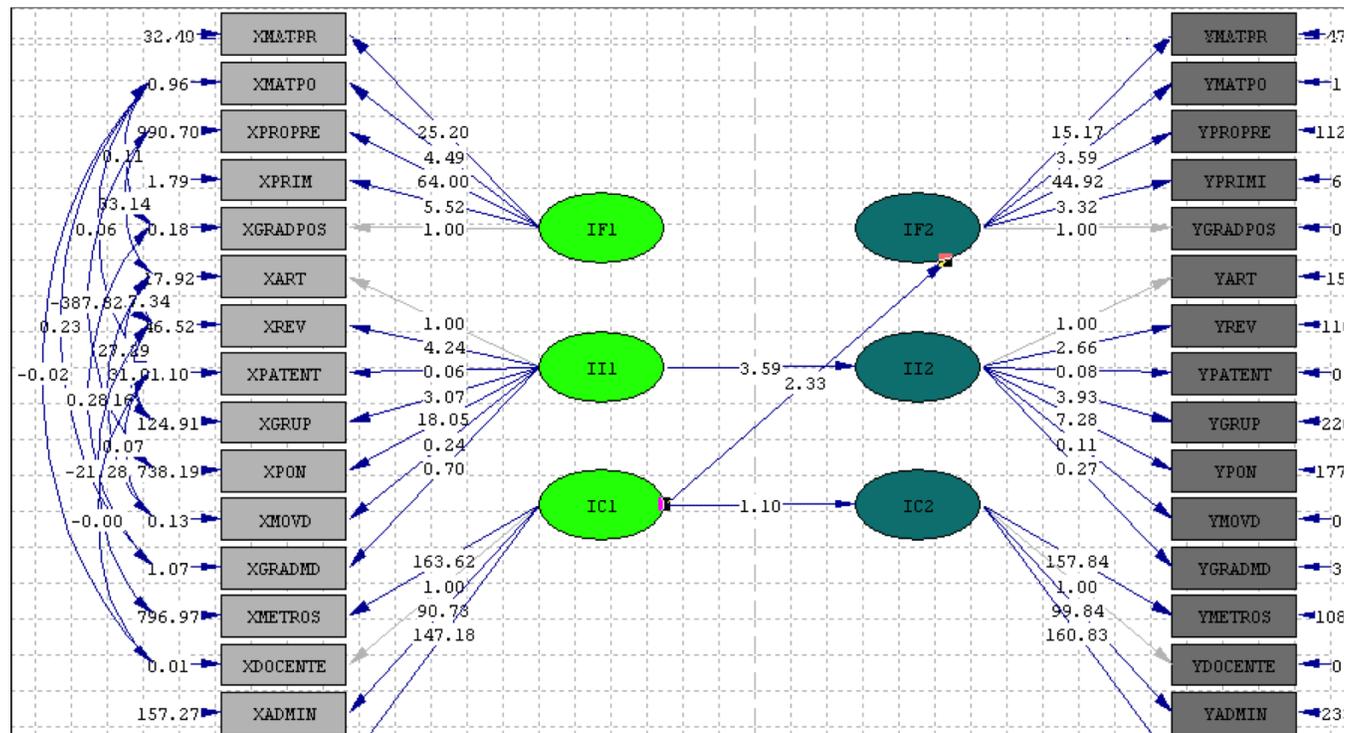


Figura 5. Valores estimados-modelo estructural completo. Submodelo 2



notorio cambio de estructura. La carga del indicador GRADPOS, ART, METROS se dejan libres como una forma de fijar la unidad de medida del índice en cada periodo correspondiente.

Teniendo en cuenta los índices de ajuste y de evaluación reportados en la Tabla 4, se observa que el

p-valor asociado a la chi-cuadrado (314.37, p=0.73) aporta evidencia para concluir que el modelo propuesto se ajusta adecuadamente a los datos. El cuadrado medio del error (RMSEA) es inferior a 0.05, y el intervalo de confianza del error cuadrático medio es aceptable. Los índices predictivos AIC y ECVI indican que el modelo propuesto es mejor que el

modelo de independencia. Esto permite concluir que todos los indicadores del modelo estructural son adecuados para inferir sobre la gestión de las universidades colombianas. Para tener un mejor ajuste del modelo, se permitieron correlaciones entre errores de medida de los indicadores.

Tabla 4. Evaluación del modelo índice de capacidad

X2	DF	GFI	RMSEA	NFI	CFI	PNFI	RMR
314.37	331	0.61	0.09	0.96	0.99	0.74	0.06

Submodelo 2

El Submodelo 2 toma como variable referencia en IC1 y IC2, el indicador "Docentes". Según la Figura 5, el incremento en el número de docentes tiene un efecto directo sobre el IF2, debido a que es un factor importante en el desarrollo de la formación académica de las universidades. Ante un aumento en la capacidad (2003-2005), el índice de formación (2006-2008) crecerá 2.33 veces más respecto a IC1. Es decir, por cada punto adicional en el indicador docentes en 2003-2005, se tuvo un crecimiento en el índice de formación en 2006-2008 de 2.33. Esto indica la importancia de la planta profesoral sobre la formación de las universidades, siendo clave para el crecimiento y el excelente desempeño en este índice.

Coeficiente de variación de la medida de los errores

El coeficiente de variación permite evaluar la calidad estadística de las estimaciones. Se considera la siguiente escala para la interpretación de los coeficientes de variación¹⁸:

- Hasta del 7%, es precisa.
- Entre el 8 y el 14% significa que existe una precisión aceptable.
- Entre el 15% y 20% precisión regular y por lo tanto se debe utilizar con precaución mayor del 20% indica que la estimación es poco precisa y por lo tanto se recomienda utilizarla sólo con fines descriptivos.

Los errores de medida analizados fueron los valores estimados dentro del modelo estructural, que corresponden a:

δ : errores de medida de las variables observables exógenas

\mathcal{E} : errores de medida de las variables observables endógenas

A continuación se presentan los CV para cada periodo de tiempo analizado, junto con los coeficientes de determinación para cada ecuación del modelo.

Tabla 5. Coeficiente de variación de los errores de medida periodo 2003-2005 y 2006-2008

Naturaleza	Indicador	CV		R2	
		2003-2005	2006-2008	2003-2005	2006-2008
Investigación	ART	0.015	0.004	0.59	0.96
	REV	0.824	0.589	0.92	0.95
	PATENT	2.759	1.279	0.53	0.9
	GRUP	1.355	0.345	0.67	0.96
	PON	0.830	0.620	0.91	0.92
	MOVD	0.009	0.010	0.93	0.92
	GRAD_MD	0.006	0.008	0.93	0.9
Formación	MATPR	0.000	0.000	0.96	0.93
	MATPO	0.000	0.000	0.8	0.79
	PROPRE	0.446	0.446	0.65	0.69
	PRIMI	0.000	0.000	0.94	0.78
	GRADPOS	0.000	0.000	0.61	0.83
Capacidad	METROS	0.000	0.000	0.84	0.82
	DOCENTES	0.000	0.000	0.95	0.93
	ADMIN	0.000	0.000	0.91	0.9
	RECFIN	0.000	0.000	0.98	0.96

Para el periodo 2003-2005, los indicadores heterogéneos son los relacionados con investigación, reportándose valores de variación de sus errores de medida superiores a 25% (es debido a bajas frecuencias de ocurrencias de las universidades de esta clase de indicadores), al igual que el indicador PROPRE de formación (44.6%).

Según la Tabla 5 para el 2006-2008, predominan valores altos en el CV los indicadores de investigación, con valores superiores a 25%, los cuales son considerados como cifras indicativas o descriptivas, al igual que PROPRE indicador de formación con 44.6%, manteniéndose estable comparado con el primer periodo (2003-2005). Se puede evidenciar la disminución o reducción de los porcentajes de los CV del primer periodo respecto al segundo, indicando mayor homogeneidad en los valores de los indicadores medidos.

El resultado anterior, revela que los indicadores de formación son más estables, más objetivos de medir, comparados con los de investigación siendo estos más subjetivos en sus medidas.

CONCLUSIONES

Desde el punto de vista metodológico, se ha podido comprobar la gran capacidad de síntesis que tienen los modelos de ecuaciones estructurales, permitiendo considerar simultáneamente todos los elementos que conforman el presente objeto de estudio, además de ofrecer una visión gráfica de las interrelaciones entre los diferentes elementos que intervienen.

En relación con los resultados de los análisis realizados, se presentan las principales conclusiones

puntuales, referente al análisis y caracterización de los indicadores de gestión de las universidades en dos periodos de tiempo.

Índice de Investigación

El efecto directo estimado desde el índice de investigación del periodo 2003-2005 hacia el índice de investigación del periodo 2006-2008 es de 3.8. Esto indica un cambio de estructura favorable positivo entre los dos periodos. Es decir, por cada punto adicional en el indicador investigación en 2003-2005, se tuvo un crecimiento en el índice de investigación en 2006-2008 de 3.8 puntos.

Respecto al comportamiento de los indicadores de investigación en el periodo 2006-2008, se observó que el índice de estabilidad de la medida más significativa fueron los de GRADMD y PON, debido a que no presentaron cambios significativos dentro de la estructura de este grupo. Los valores de confiabilidad oscilaron entre 0.9 y 0.98. El indicador de PATEN en este periodo experimentó un comportamiento decreciente en su fiabilidad, pasando de un 99% del 2006 a un 41% en el 2008. Definitivamente las patentes no es un indicador de confiabilidad para el índice de investigación estadísticamente. Este fenómeno también se observa en el periodo anterior, donde no es un indicador que aporta de manera significativa al índice. El indicador GRUP presentó un comportamiento decreciente en su fiabilidad pasando de un 98% a un 88% en el 2008. Esta consecuencia se debe a las pocas patentes que las universidades han experimentado en el transcurso del proceso del modelo de gestión desde sus inicios, siendo las universidades más grandes las que experimentan con mayor fuerza este aspecto.

Índice de Formación

El efecto directo estimado desde el índice de formación del periodo 2003-2005 hacia el índice de formación del periodo 2006-2008 es de 1.57. Esto indica que hubo un cambio favorable y positivo entre los dos periodos, reflejando el mejoramiento en la actividad de la formación.

Se ha podido determinar un grupo de indicadores mediante los cuales se podría evaluar de manera confiable el índice de formación. Además, se ha podido construir un modelo de medida con un aceptable ajuste a los datos. En la práctica, significa que estos indicadores son más objetivos de medir, más estables comparados con indicadores de otra naturaleza.

En términos de ampliación de cobertura (PRIM), este indicador tuvo un comportamiento estable tal y como se menciona en el estudio citado por el autor³. Igualmente, el indicador PROPRE se ha mantenido en su comportamiento en este primer periodo. Este resultado lleva a pensar que las universidades no han

ampliado su oferta en términos de nuevos programas académicos en el periodo considerado.

Índice de Capacidad

Entre los indicadores de capacidad, el más confiable en el periodo 2003-2005 se refiere a RECF con un 98% de fiabilidad, manteniéndose constante en los tres años (2003-2005), seguido de DOCENT Y ADM (93% Y 92% respectivamente). En el periodo 2006-2008, se presenta un leve decrecimiento en la fiabilidad de los indicadores METROS y DOCENT, comparado con el primer periodo. Este índice, en su comportamiento en el tiempo no presenta cambios significativos.

No hubo un cambio de comportamiento en la estructura de los indicadores de capacidad entre los dos periodos de estudio. Estos indicadores son más estables comparados con los demás indicadores. Claramente se observa la incidencia de las políticas educacionales en el comportamiento de este índice. El decrecimiento en gastos administrativos es reflejo de ello.

El análisis anterior permite llegar a una conclusión general: ha habido un cambio de comportamiento en la política educacional del país, lo que refleja un salto no solo cuantitativo sino cualitativo, reflejo de una nueva filosofía de compromiso efectivo y cierto con el desarrollo científico colombiano. El componente investigativo tiene dos comportamientos claramente diferenciados: el periodo correspondiente a los tres primeros años (2003, 2004, 2005), y el periodo conformado por los últimos años (2006, 2007, 2008), consecuencia del hecho de que la investigación es una preocupación nueva en las universidades colombianas. Desde el punto de vista de la calidad de los indicadores, puede entonces aseverarse que estos indicadores de investigación son más heterogéneos que los indicadores de formación y por ende de inferior calidad. Se espera que se involucren otro tipo de indicadores que estén acordes a la actualidad como son en materia de innovación y tecnología, relación entre el sector productivo y las universidades, entre otros.

BIBLIOGRAFIA.

1. Observatorio de la Universidad Colombiana. Por su gestión de recursos, éstas son las IES con mayores beneficios en la distribución de recursos de Ley 30. En línea: www.universidad.edu.co/index.php?option=com_content&view=article&id=969%3Apor-su-gestion-de-recursos-estas-son-las-ies-publicas-con-mayores-beneficios-en-la-distribucion-de-recursos-de-ley-30&catid=16%3Anoticias&Itemid=198, Consulta: 23 de marzo de 2013.
2. Ministerio De Educación Nacional de Colombia. Propuesta metodológica para la distribución de recursos

artículo87delaley30de1992vigencia2013.Enlínea:http://www.mineducacion.gov.co/sistemasdeinformacion/1735/articles-212353_modelo1.pdf, consulta: 20 de marzo de 2013.

3. Yáñez, G. Análisis comparativo de los indicadores de gestión de las instituciones de educación superior de mayor tamaño. Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga, Colombia, (2010).

4. Soto, J. La producción académica como uno de los indicadores del desempeño de las universidades públicas colombianas desde la perspectiva del análisis envolvente de datos, *Scientia et Technica*. 2005; 2 (28): 109-14.

5. De los Ríos, D. Indicadores de calidad y eficiencia en la educación universitaria: algunas propuestas para el sistema de acreditación chileno. Universidad de Chile. Tesis de grado. Santiago, (2000).

6. González, P. Aplicación del Lisrel al análisis del rendimiento estudiantil. *Revista Económica*. Universidad De Los Andes, Mérida, (1989). No 4, p. 55-73. Disponible en <http://www.saber.ula.ve/bitstream/123456789/19294/2/articulo4.pdf>

7. Hernández, A. Evaluating the Multiple-Group Mean and Covariance Structure Analysis model for the detection of Differential Item unctoning in polytomous ordered ítems. *Revista Psicothema* 2003; 15 (2) 315-21.

8. Hernández, J. Universidades e Indicadores de Gestión: El documento de la Conferencia de Rectores de las Universidades Españolas. Universidad Carlos III. Madrid, España, (2003).

9. Salafranca, L., Freixa; M. y Guàrdia, J. Aplicación del análisis exploratorio de datos en los sistemas de ecuaciones estructurales. *Anales de Psicología*.1992; 8 (1-2): 121-30.

10. Joreskög, D. LISREL 8: Structural Equation modeling with the SIMPLIS Command language. Scientific Software Internacional, (2001).

11. Bollen, K. *Structural Equations with Latent Variables*. Wiley & Sons. New York, (1989).

12. Hair, J. *Análisis Multivariante*. Prentice Hall. 5ª Ed. España, (1999).

13. Caballero, A. SEM vs PLS: Un enfoque basado en la práctica. Memorias IV congreso de metodología de Encuestas. En línea: http://emoinsights.com/downloads/articulos/SEM_vs_PLS.pdf, Consulta: 25 de marzo de 2013.

14. Ruiz, M. Modelos de ecuaciones estructurales.

Facultad de Sicolología. Universidad Autónoma de Madrid. *Papeles del psicólogo*. 2010; 31(1): 34-45.

15. Rivera, C. Un modelo estructural de Multidimensional Scaling para datos asimétricos. Memorias Congreso Nacional de Estadística e Investigación Operativa SEIOS. Valladolid, (2007).

16. Manzano, A. Sistema de ecuaciones estructurales: una herramienta de investigación. CENEVAL. México, (2009).

17. Schreider, J.B., Stage, F.K., King, J., Nora, A., Barlow, E.A. Reporting structural equation modeling and confirmatory factor analysis results: a review. *J Educ Res*. 2006; 99 (6): 323-37.

18. Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE). Estimación e interpretación del coeficiente de variación de la encuesta cocensal. En línea: http://www.dane.gov.co/files/investigaciones/boletines/censo/est_interp_coefvariacion.pdf. Consulta: 5 de abril de 2013.

Innovaciencia 2014; 2 (1): 22 - 29

FACTORES ASOCIADOS AL RENDIMIENTO EN LAS PRUEBAS SABER PRO EN ESTUDIANTES DE INGENIERÍA CIVIL EN UNIVERSIDADES COLOMBIANAS

FACTORS ASSOCIATED WITH PERFORMANCE ON TESTS "SABER PRO" OF CIVIL ENGINEERING STUDENTS OF COLOMBIAN UNIVERSITIES

Wolfgang Alexander Osma Castellanos¹, Adrián David Mojica Perdomo²,
Tulia Esther Rivera Flórez³

Cómo citar este artículo: Osma Castellanos WA, Mojica Perdomo AD, Rivera Flórez TE. Factores asociados al rendimiento en las pruebas saber pro en estudiantes de ingeniería civil en una universidad colombiana. Innovaciencia facultad cienc. exactas fis. naturales. 2014; 2(1): 22 - 29

Artículo recibido el 3 de mayo de 2014 y aceptado para publicación el 20 de agosto de 2014

RESUMEN

Introducción: Las pruebas académicas Saber Pro son de carácter oficial y obligatoriamente forman parte con otros procesos y acciones, de un conjunto de instrumentos que el Gobierno Nacional de Colombia dispone para evaluar la calidad del servicio educativo del sector oficial y privado; también son utilizadas como fuente de selección para convocatorias en becas de posgrado y/o selección de personal en distintas empresas. **Materiales y Métodos:** En este proyecto se analizaron los resultados de las pruebas Saber Pro 2010 de los estudiantes de últimos semestres de Ingeniería Civil a nivel nacional para determinar los factores que influyen en los puntajes obtenidos. Se estudiaron diferentes variables, cualitativas como cuantitativas, asociadas al puntaje obtenido mediante métodos estadísticos como las tablas de contingencia y el análisis de correspondencia simple y múltiple. **Resultados y Discusión:** La prueba Ji-cuadrado respalda la independencia de las variables *trabaja* ($p=0,858$) y *título* ($p=0,433$) en asociación con la variable puntaje, señalando que ni el título de bachiller obtenido por el estudiante, ni si el individuo trabaja o no, tienen relación con los resultados que obtiene en las pruebas. Por el contrario para las variables *género* ($p=0,000$), *tipo* ($p=0,000$), *educación padre* ($p=0,000$), *educación madre* ($p=0,000$) y *estrato* ($p=0,000$), se concluye que sí juegan algún papel en los resultados. **Conclusiones:** El análisis de correspondencias para los estudiantes permite concluir que los puntajes superiores a la media se asocian con estudiantes del género masculino, que estudian Ingeniería Civil en instituciones públicas, tienen padres con estudios universitarios y viven en los estratos sociales 4, 5 ó 6. Por otro lado es importante formular nuevos estudios donde se analicen otras variables que puedan explicar los resultados y la implementación de otros modelos estadísticos como: el análisis por discriminantes, análisis por componentes

1. Licenciado en Matemáticas. Esp. en Estadística. Profesor asistente. Universidad de Santander. Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. Grupo Ciencias Básicas y Aplicadas para la Sostenibilidad CIBAS. Bucaramanga. Colombia. Correspondencia: alexanderosma@hotmail.com

2. Licenciado en Matemáticas. Esp. en Estadística. Profesor asistente. Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. Universidad Cooperativa de Colombia. Barrancabermeja. Colombia.

3. Licenciado en Matemáticas. Mágister en Estadística. Profesor Titular. Facultad de Matemáticas. Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga. Colombia.

principales y análisis por regresión logística.

Palabras Clave: Saber Pro, Ingeniería Civil, Análisis estadístico, Tablas de contingencia, Análisis de correspondencia.

ABSTRACT

Introduction: Academic tests “Saber pro” are official and mandatory form part of a group of instruments used by the colombian government to assess the quality of the educational service both in the private and public sectors. They are also used as a selection tool for calls in graduate fellowships and/or recruitment in various companies. **Materials and Methods:** Results from “Saber Pro” test from last semester students of civil engineering nationwide were analyzed in this study, to determine the factors that influence scores. Different variables, qualitative and quantitative, associated with the score obtained by statistical methods such as contingency tables and analysis of simple and multiple correspondence were studied. **Results and Discussion:** The Chi-square test supports the independence of working variables ($p = 0.858$) and title ($p = 0.433$) in association with the score variable, indicating that neither a high school diploma earned by the student, or if the individual works or not, are related to the results obtained in the tests. In contrast to the variables *gender* ($p = 0.000$), *type* ($p = 0.000$), *education parent* ($p = 0.000$), *mother's education* ($p = 0.000$) and *stratum* ($p = 0.000$), we conclude that they do play a role results. **Conclusions:** Correspondence analysis allows students to conclude that the higher than average scores are associated with male students, studying Civil Engineering at public institutions, have parents with college and living in social strata 4, 5 or 6. Moreover it is important to develop new studies where other variables that might explain the results and the implementation of other statistical models are analyzed as: discriminant analysis, principal component analysis and logistic regression analysis.

Keywords: Saber Pro, Civil Engineering, Statistical analysis, Contingency tables, Correspondence analysis.

INTRODUCCIÓN

Las pruebas Saber Pro, son definidas como “pruebas académicas de carácter oficial y obligatorio que forman parte, con otros procesos y acciones, de un conjunto de instrumentos que el Gobierno Nacional dispone para evaluar la calidad del servicio educativo” (Artículo 1, decreto 1781) y son aplicadas de manera voluntaria en Colombia desde el año 2003 según la constitución política de 1991 y la ley 30 de 1992, en estudiantes de últimos semestres en los programas de pregrado de las diferentes instituciones de educación superior. A partir

del año 2009 las pruebas son de carácter obligatorio y como requisito de grado.

Estas pruebas, además de ser un referente del grado de educación del estudiante, son también utilizadas como fuente de selección para la convocatoria de becas de posgrado, selección de personal en distintas empresas, tanto nacionales como internacionales. Adicional a esto las instituciones educativas las han convertido en un referente de calidad, resaltando los mejores resultados obtenidos por sus estudiantes, dejando a un lado el verdadero sentido académico que puede ser analizado por los resultados obtenidos en cada una de las instituciones como son el autoevaluarse, analizar los resultados que permitan mejorar los rendimientos académicos, entre otros.

Es por ello que se realiza el presente análisis, que permite dar referencia de los diferentes factores que se correlacionan con los resultados y que puedan generar políticas que conlleven a un mejoramiento de la calidad educativa de cada Institución de Educación Superior (IES).

Las Pruebas Saber Pro en Colombia, son un examen realizado a nivel nacional que busca medir la calidad de la educación superior, siendo un instrumento estandarizado administrado por el ICFES y del cual dispone el gobierno nacional para evaluar, inspeccionar y vigilar la calidad del servicio de educación superior¹. La prueba es organizada por módulos que evalúan las competencias consideradas fundamentales. Entre ellas están las genéricas que deben desarrollar todos los estudiantes de educación superior independientemente del programa académico, las específicas comunes a los programas de la misma línea de formación. Las cognitivas que son el fundamento del modelo de evaluación del ICFES según las describe la Asociación Colombiana de Facultades de Ingeniería orientándola para la prueba SABER PRO y se definen así: Competencia Interpretativa, Argumentativa y Propositiva¹.

Basados en estos modelos el ICFES estructuró los elementos de evaluación de la prueba SABER PRO para cada programa académico y las componentes evaluadas en el programa de ingeniería civil se pueden observar en el anexo 1 y 2. Cabe advertir que a partir de la expedición de la Ley 1324 de 2009 la prueba es de carácter obligatorio para los estudiantes.

METODOLOGÍA

Los resultados de las pruebas saber pro analizadas en este trabajo fueron tomadas de la página web del ICFES www.icfes.gov.co y corresponden a las presentadas en el año 2004 a 2010. La base de datos del ICFES cuenta con cerca de 63 variables (cualitativas y cuantitativas) clasificadas en los siguientes grupos: Información de la prueba, información general del estudiante, información de discapacidad del estudiante, información sobre la institución educativa y resultados

Tabla 1. Variables categóricas y sus respectivos niveles

VARIABLE	NO.	VALOR
Género	1	Masculino
	2	Femenino
Tipo	1	Privada
	2	Pública
Educación Padre	1	Primaria
	2	Secundaria Y/O Tecnología
	3	Universitaria Y/O Posgrados
Educación Madre	1	Primaria
	2	Secundaria Y/O Tecnología
	3	Universitaria Y/O Posgrados
Estrato	1	Estrato Bajo
	2	Estrato Medio
	3	Estrato Medio Alto
	4	Estrato Alto
Trabaja	1	No
	2	Si
Titulo	1	Bachiller Académico
	2	Otro
Puntaje	1	[<90] Bajo
	2	[90 - 100) Medio
	3	[100 – 110) Alto
	4	[>= 110] Muy Alto

de desempeño académico. Estas pruebas han sufrido modificaciones constantemente (ver anexo 3).

Para el presente análisis se contó con variables que hacen referencia a aspectos de los estudiantes y se clasifican y categorizan en la tabla 1.

El estudio se inicia con el análisis de tablas de contingencia y de las pruebas de independencia entre las variables cualitativas², y posteriormente se relacionan algunos conceptos básicos del análisis de correspondencias^{3, 4, 5}.

Los métodos estadísticos empleados fueron las tablas de contingencia y el análisis de correspondencia y se analizaron con ayuda de programas computacionales como Statistical Package for the Social Sciences® (SPSS 18.0), Process Analysis Desing and Enactment® (SPAD 5.6) y Microsoft® Excel 2010.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Con los datos almacenados en las bases de datos se realizó el análisis estadísticos (ver tabla 2) de tendencia central y variabilidad para la variable Puntuación_prom, así como también el histograma de frecuencias y diagramas de caja (Figura 1).

Tabla 2. Descriptivos, histogramas, diagramas de caja y pruebas de normalidad para la variable PUNTAJE.

ESTADÍSTICOS DESCRIPTIVOS.	ESTADÍSTICO	ERROR TÍPICO	
PUNTAJE	Media	100,0652	0,22385
	Mediana	99,6500	
	Varianza	113,401	
	Desviación típica	10,64898	
	Mínimo	72,46	
	Máximo	145,33	
	Asimetría	0,358	0,051
	Curtosis	0,124	0,103

Los datos de la tabla indican que la variable presenta una distribución con media igual a 100,06, desviación 10,65 y un valor en la mediana (99,65) muy cerca al valor de la media, el 50% de los estudiantes fueron evaluados con un puntaje superior a este valor, siendo el puntaje máximo alcanzado de 145,33 y el mínimo de 72,46.

Figura 1. Histograma de frecuencias y diagramas de caja para la variable puntaje.

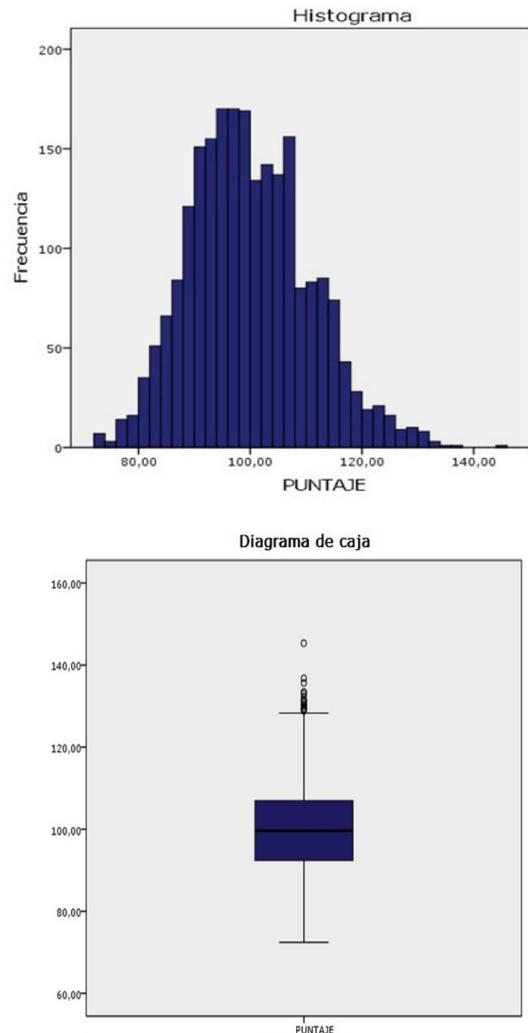


Figura 1. El histograma de frecuencias presenta una curva de asimetría positiva, y en el diagrama de cajas deja ver una distribución con algunos datos extremos. Las pruebas de normalidad con un valor de significancia nulo rechazan la hipótesis de que los datos se distribuyen aproximadamente como una normal y la nube de puntos en el diagrama Q-Q presenta hacia los extremos un alejamiento de los puntos de la diagonal.

Para indagar sobre la asociación de algunas características de los estudiantes con relación a los puntajes obtenidos en la evaluación Saber Pro se realizó el análisis de las tablas de contingencia para medir la independencia entre las variables categóricas utilizando la prueba χ^2 los cuales se resumen en la tabla 3.

Tabla 3. Pruebas Ji-cuadrado de Pearson.

VARIABLE	χ^2	gl	VALOR_P	RESULTADO
Género * Puntaje	82,964 ^a	3	0,000*	Dependientes
Tipo * Puntaje	105,844 ^a	3	0,000*	Dependientes
Educación Padre *Puntaje	54,163 ^a	6	0,000*	Dependientes
Educación Madre *Puntaje	31,838 ^a	6	0,000*	Dependientes
Estrato * Puntaje	59,502 ^a	9	0,000*	Dependientes
Trabaja * Puntaje	0,765 ^a	3	0,858	Independientes
Título * Puntaje	2,743 ^a	3	0,433	Independientes

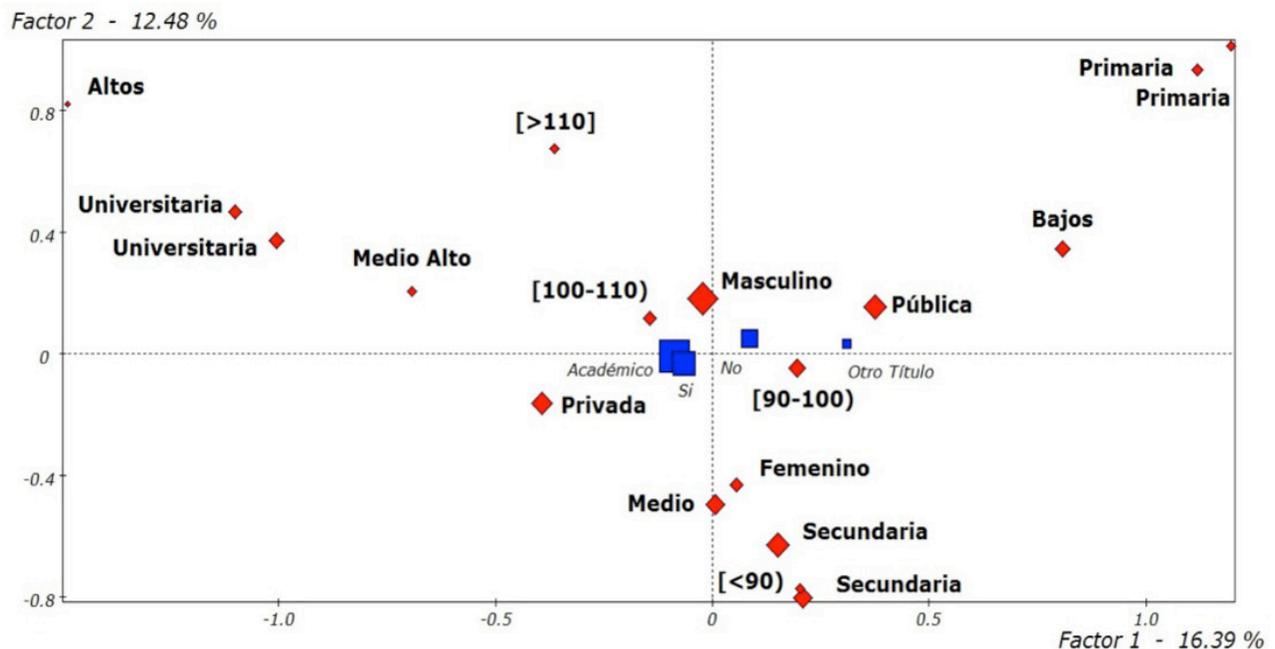
*Variable significativas al 0,01

La prueba Ji-cuadrado respalda la independencia de las variables *trabaja* y *título* en asociación con la variable puntaje, señalando que ni el título de bachiller

obtenido por el estudiante, ni si el individuo trabaja o no, tienen relación con los resultados que obtiene en las pruebas. Por el contrario para las variables género, tipo, educación padre, educación madre y estrato se concluye que sí juegan algún papel en los resultados. Al realizar el análisis de correspondencias simple (ACS) entre el puntaje y las variables dependientes se observó que las variables género y tipo una sola dimensión contribuye en la inercia total. Caso contrario a las variables Educación Padre, Educación madre y estrato en las que dos dimensiones para las dos primeras y tres dimensiones para la última contribuyen en la inercia total.

El Análisis de Correspondencias Múltiple (ACM), se realizó tomando como variables activas las que en los análisis anteriores exhibieron dependencia con la variable Puntaje: género, tipo, educación del padre, educación de la madre y estrato; y como variables suplementarias, título y trabaja que manifestaron independencia. Este análisis permitió observar las contribuciones de cada una de las dimensiones a la inercia total y de igual forma los valores correspondientes a las coordenadas de los puntos filas, sus pesos y las contribuciones absolutas y relativas (cosenos cuadrados). Donde se pudo apreciar que con una dimensión se capta el 16,39% de la variabilidad total de los datos, y conjuntamente con la segunda dimensión (12,48%) explican solo el 28,87%, indicando que este plano no percibe de forma satisfactoria la asociación completa entre las variables de estudio. Con tres dimensiones ese valor llega a 39,40%, siendo necesario un mínimo de 5 dimensiones para explicar un poco más del 50% de la variabilidad observada en los datos. (Ver anexo 5).

Figura 2. Plano factorial eje 1 * eje 2



En la Figura 2, se presenta el primer plano factorial con las proyecciones de las distintas modalidades de las variables activas.

Al primer eje contribuyen de forma conjunta las modalidades de primaria, universitaria (tanto de la educación del padre como de la madre), estratos altos y estratos bajos explicando un 84,3% de su inercia total. Opone los estudiantes cuyos padres tienen formación universitaria y viven en estratos altos, de los estudiantes que tienen padres con formación primaria y viven en los

estratos bajos. Al segundo eje aportan las modalidades de primaria y secundaria (tanto en la educación del padre como de la madre), estrato medio, puntajes inferiores a 90 y puntajes superiores a 110 capturando el 84,6% de su inercia total. Contraponen a los estudiantes con puntajes en el extremo superior de la escala, que viven en estratos altos y tienen padres con formación académica de primaria, de los estudiantes que tienen puntajes en el extremo inferior de la escala, viven en estratos medios y sus padres tienen estudios de secundaria. Los Figuras 3 y 4 muestran el plano factorial conformado por los ejes

Figura 3. Plano factorial eje 1 * eje 3

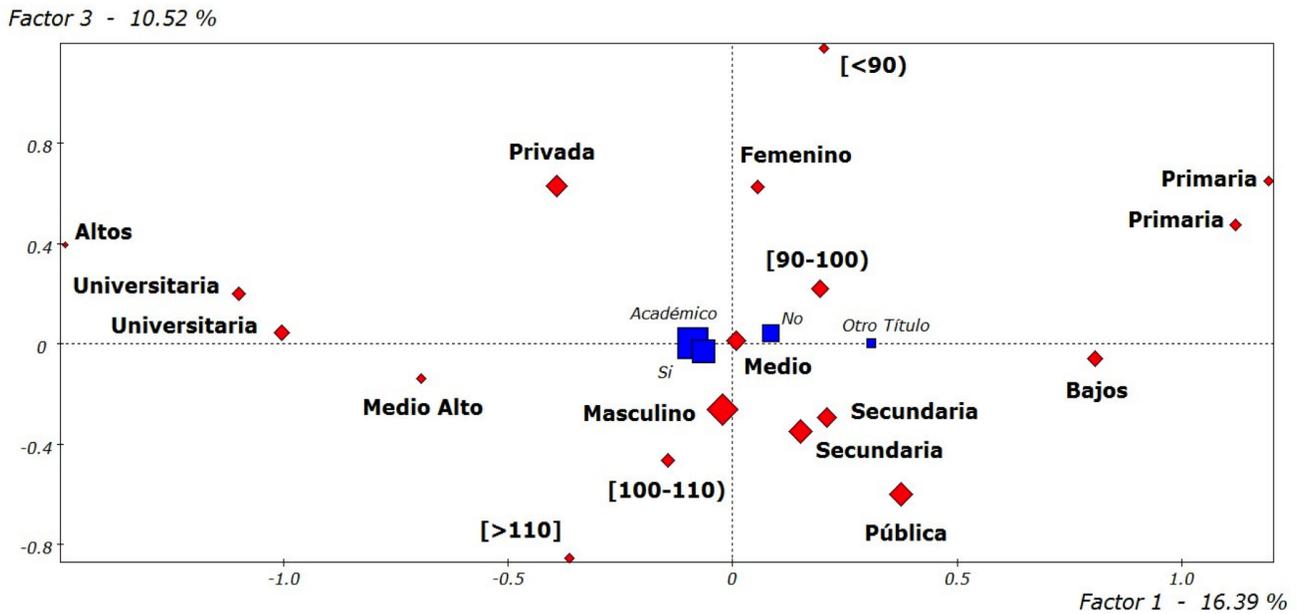


Figura 4. Plano factorial eje 1 * eje 4

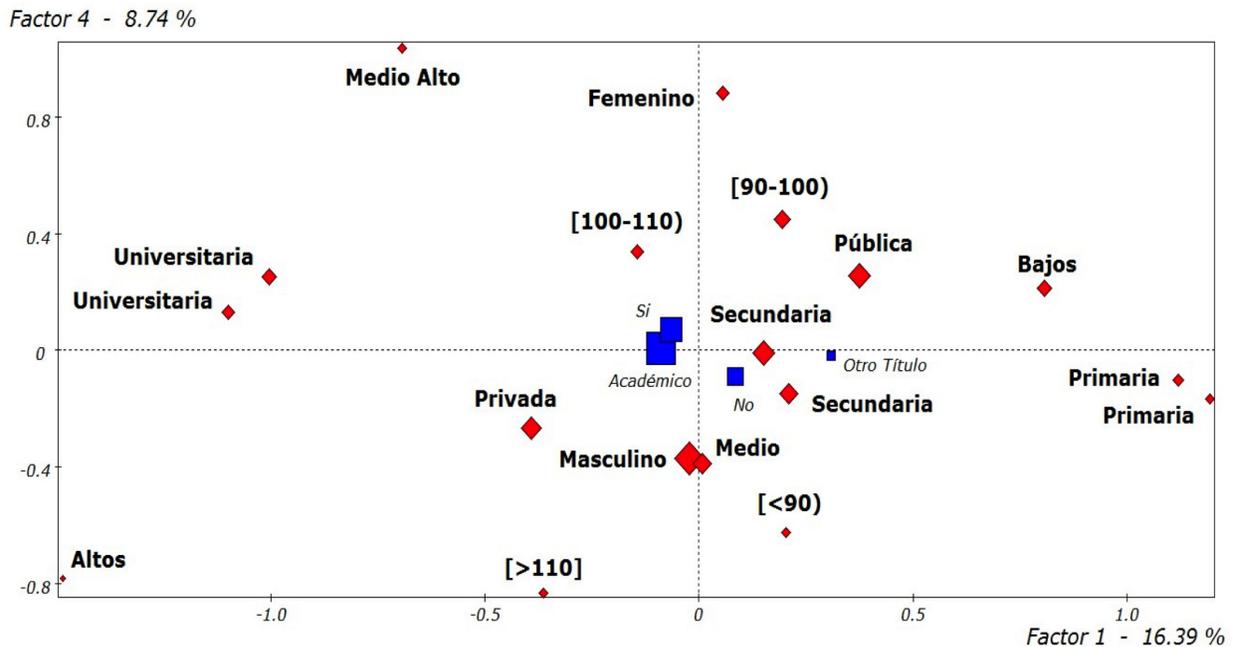
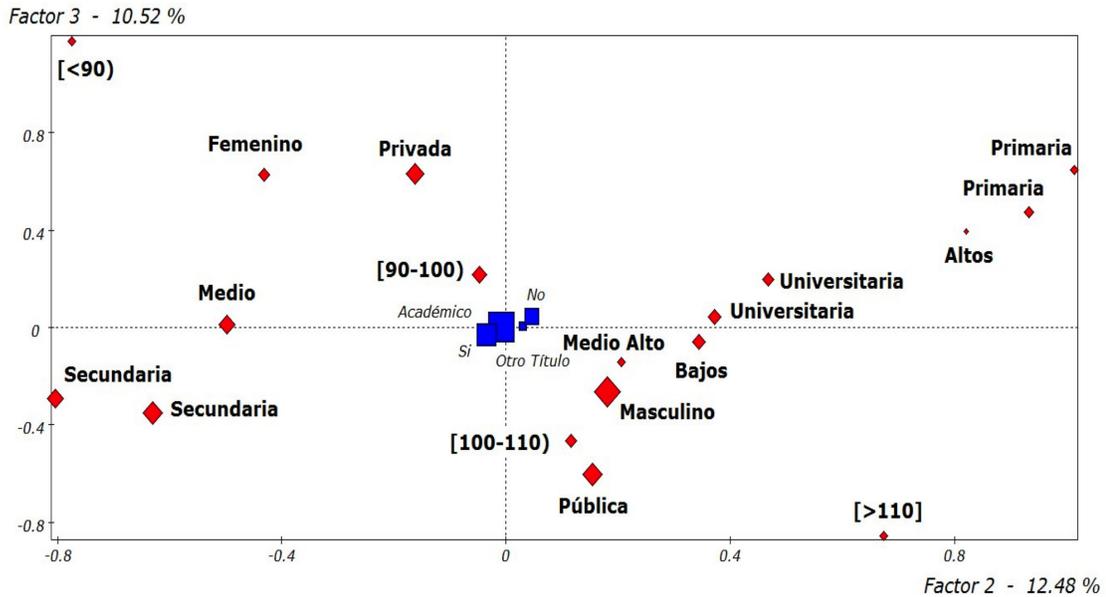


Figura 5. Plano factorial: eje 2 * eje 3.



1*3 y 1*4 respectivamente.

La mayor contribución a la inercia del eje tres (35,9%) la aportan las modalidades de la variable puntaje, seguida por las de tipo (30,1%), género (13%) y educación madre (12,4%). Esta dimensión separa a los estudiantes con puntajes (<90), del género femenino que estudian en instituciones privadas y tienen madres con educación primaria, de los estudiantes hombres con puntajes muy altos que cursan estudios en IES públicas y sus madres recibieron educación secundaria.

Al eje cuatro contribuyen en casi una tercera parte (32,1%) de su inercia las modalidades: femenino, estrato medio alto y puntaje [>110]. Este eje opone a los estudiantes del género femenino de estrato medio alto y puntajes en los niveles intermedios, de los estudiantes hombres pertenecientes a estratos altos y con puntajes mayores a 110.

La Figura 5 presenta el plano factorial con la combinación de los ejes dos y tres que acumulan un 23% de la inercia total. En ella se puede observar que se distinguen dos grupos: un grupo de estudiantes mujeres con puntaje bajo, que son de estrato medio y sus padres tienen estudios de secundaria, y el otro grupo, de estudiantes con puntajes superiores a 110, que son de estrato alto y sus padres tienen formación primaria.

Analizadas las contribuciones de las categorías a los ejes, la inercia captada por los ejes, la calidad de las representaciones y la interpretación de los diferentes planos factoriales, del análisis de correspondencias se puede deducir que:

- Los puntajes superiores a la media se asocian más

con estudiantes del sexo masculino y los inferiores con los de sexo femenino.

- Los resultados altos y muy altos favorecen más a los estudiantes de instituciones públicas que privadas.
- Los estudiantes que tienen padres con estudios universitarios se asocian más con los que obtienen puntajes altos y muy altos que los que tienen padres con menos estudios.
- Los estudiantes de los estratos medios y altos se asocian con los puntajes más altos.
- Los estudiantes que obtienen puntajes por encima de la media se pueden asociar con estudiantes del género masculino que viven en los estratos medios y altos, tienen padres con formación universitaria y estudian en IES de carácter público.

CONCLUSIONES

Para el año 2010 el número de estudiantes de Ingeniería Civil que presentaron las pruebas Saber Pro a nivel nacional fue de 2263 que se corresponde con un aumento del 69,25% en comparación con los 1337 que fueron evaluados en el año inmediatamente anterior. El puntaje promedio que obtuvieron los estudiantes de este programa para este año fue de 100,06, completando el cuarto año consecutivo donde el programa alcanza únicamente el valor de la media normalizada que tiene el ICFES.

Del total de estudiantes evaluados, los de instituciones públicas representan un poco más de la mitad (51,2%) disminuyendo este porcentaje en 5,5 puntos con respecto al año 2009 (56,7%). Sin embargo

el puntaje promedio que alcanzaron (102,11) tuvo un pequeño aumento con respecto al 2009 que fue de 100,8. Un poco mayor es el aumento que presentaron las instituciones privadas que obtuvieron 97,91 sobre los 93,0 del año anterior. Con respecto al género se conservan relativamente los mismos porcentajes que se han observado en el tiempo para este programa, siendo la mayor participación de estudiantes hombres con un 70,9% en el último año. Estas bases de datos están publicadas en la página web del ICFES.

El análisis de independencia de las variables consideradas para los resultados de los estudiantes señala que ni la situación laboral, ni el título de bachiller obtenido influyen en el puntaje que obtienen en la prueba.

El análisis de correspondencias para los estudiantes permite concluir que los puntajes superiores a las medias se asocian con estudiantes del género masculino, que estudian Ingeniería Civil en instituciones públicas, tienen padres con estudios universitarios y viven en los estratos sociales 4, 5 ó 6. Considerando lo anterior es importante formular nuevos estudios donde se analicen otras variables que puedan explicar los resultados y la implementación de otros modelos estadísticos como: el análisis por discriminantes, análisis por componentes principales y análisis por regresión logística, que vayan más allá de lo descriptivo para conocer el impacto de las pruebas Saber Pro. En el 2014, el ICFES, realizó una convocatoria dirigida a grupos de investigación y a estudiantes de posgrado para presentar propuestas de investigación que promuevan el uso de los resultados de las pruebas aplicadas por el Instituto en investigaciones rigurosas que aporten información confiable para mejorar la calidad de la educación en el país¹.

BIBLIOGRAFÍA

1. ICFES. Icfes mejor saber. [En línea] 15 de Agosto de 2014. [Citado el: 20 de Agosto de 2014.] Disponible en <http://www.icfes.gov.co/examenes/saber-pro/informacion-general>.
2. Díaz Monrroy, L G y Morales Rivera, M A. Análisis estadístico de datos categóricos. Bogotá : Universidad Nacional de Colombia, 2009.
3. Peña, D. Análisis de datos multivariantes. Madrid : McGrawHill, 2002.
4. Greenacre, M. La práctica del análisis de correspondencias. Barcelona : Fundación BBVA, 2008.
5. Díaz Monrroy, L G. Estadística multivariada: Inferencia y métodos. Bogotá : Universidad Nacional de Colombia, 2007.

ANEXOS

ANEXO 1. Modelo de evaluación del ICFES para estudiantes de Ingeniería Civil. (pág siguiente)

Fuente: ICFES. Orientaciones para el examen de estado de calidad de la educación superior Saber Pro (ECAES). Guías. (2011).

Anexo 2. Número de estudiantes que han presentado la prueba saber Pro en el periodo 2004-2010

AÑO	TOTAL ESTUDIANTES
2004	2658
2005	2172
2006	2003
2007	1695
2008	1615
2009	2953
2010	2268
TOTAL	15364

Fuente: ICFES. Orientaciones para el examen de estado de calidad de la educación superior Saber Pro (ECAES). Guías. (2011).

Anexo 3. Componentes evaluadas en las versiones de las Pruebas Saber Pro 2004-2010 (pág siguiente)

Fuente: ICFES. Orientaciones para el examen de estado de calidad de la educación superior Saber Pro (ECAES). Guías. (2011).

Anexo 4. Estructura de la prueba Saber Pro

Pruebas Genéricas	No. de Preguntas	Tiempo asignado
Comunicación escrita	Un escrito	40 minutos
Solución de problemas	93 preguntas	3 horas 50 minutos
Pensamiento crítico		
Entendimiento interpersonal		
Comprensión lectora	15 preguntas	4 horas 30 minutos
Inglés	40 preguntas	
Tiempo total de la prueba		

Fuente: ICFES. Orientaciones para el examen de estado de calidad de la educación superior Saber Pro (ECAES). Guías. (2011).

ANEXO 1. Modelo de evaluación del ICFES para estudiantes de Ingeniería Civil.

Modelo de evaluación del ICFES para estudiantes de Ingeniería Civil.

DEFINICIÓN DE ELEMENTOS DE LA ESTRUCTURA DE PRUEBA ECAES PARA INGENIERÍA CIVIL			
Componentes de la prueba	Competencia cognitiva interpretación	Competencia cognitiva argumentación	Competencia cognitiva proposición
Modelamiento de fenómenos y procesos	Identifica los aspectos y características relevantes de un fenómeno o proceso	Establece y analiza relaciones que representan fenómenos o procesos y modela fenómenos y procesos	Plantea hipótesis y genera alternativas de modelos que representan un fenómeno o proceso
Resolución de problemas, mediante la aplicación de las ciencias naturales y las matemáticas utilizando un lenguaje lógico y simbólico	Identifica y comprende las variables que definen un problema	Selecciona métodos apropiados y resuelve un problema	Plantea hipótesis y genera alternativas de solución de problemas
Comunica efectiva y eficazmente en forma escrita, gráfica y simbólica	Lee, comprende e interpreta textos científicos, gráficas, datos e información experimental, planos e imágenes de sistemas mecánicos	Argumenta ideas técnicas a través de textos, gráficas, reportes de datos experimentales, planos e imágenes	Propone ideas técnicas a través de textos, gráficas, reportes de datos experimentales, planos e imágenes
Diseño de sistemas, componentes o procesos que cumplan con especificaciones deseadas	Definir especificaciones apropiadas para diseños de Ingeniería	Analiza, establece y relaciona elementos de las especificaciones	Plantea posibles nuevos diseños a partir de la aplicación de principios científicos y conocimientos tecnológicos
Planeación, diseño, evaluación del impacto (social, económico, tecnológico y ambiental) y gestión proyectos de ingeniería civil	Identifica aspectos relevantes de un proyecto y traslada su definición a términos de ingeniería	Analiza y establece las mejores prácticas aplicables en un proyecto y dimensiona sus consecuencias de tipo social y ambiental y formula proyectos	Propone nuevas formas de gestionar proyectos de ingeniería
Planear, diseñar, evaluar y definir metodologías para la adquisición de datos y el diseño de experimentos	Identifica información necesaria para el diseño o la modelación de un problema en ingeniería	Interpreta y analiza eficientemente información experimental o de campo dentro del contexto del problema que está resolviendo	Propone metodologías para la adquisición de datos y diseña experimentos como parte de la solución de problemas

Anexo 3. Componentes evaluadas en las versiones de las Pruebas Saber Pro 2004-2010

Competencias	2004-2008	2009	2010
Genéricas	Comprensión lectora común	Pensamiento crítico	Pensamiento crítico
		Entendimiento interpersonal	Entendimiento interpersonal
			Comprensión comunicativa escrita
		Comprensión, escritura, argumentación	Comprensión lectora puntaje
	Comprensión lectora desempeño		
	Inglés común	Inglés puntaje	Inglés puntaje
Inglés desempeño		Inglés desempeño	
específicas	Resolución de problemas en ingeniería	Solución de problemas	Solución de problemas
	Diseño sistemas componentes procesos		
	Modelamiento de fenómenos		
	Planeación, diseño, evaluación definición		
	Planeación, diseño, específicas evaluación del impacto		

Innovaciencia 2014; 2 (1): 30 - 37

EL POLILOGARITMO AYUDA A CORROBORAR LA RELACIÓN ENTRE LA ENTROPÍA Y EL ÁREA DE UN AGUJERO NEGRO

THE POLYLOGARITHM HELPS TO UNDERSTAND THE RELATION BETWEEN BLACK HOLE'S ENTROPY AND AREA

Francisco Ricardo Muñoz Muñoz ¹

Cómo citar este artículo: Muñoz-Muñoz FR. El polilogaritmo ayuda a corroborar la relación entre la entropía y el área de un agujero negro. Innovaciencia facultad cienc. exactas fis. naturales. 2014; 2(1): 30 - 37

Artículo recibido el 10 de diciembre de 2013 y aceptado para publicación el 15 de abril de 2014

RESUMEN

Introducción: Se inicia con definiciones y aclaraciones de conceptos involucrados en la dinámica de los agujeros negros. **Materiales y métodos:** Se desarrolla la revisión del tema partiendo del hecho de que al agujero negro lo rodee un “mar de fotones” creado gracias al proceso de acreción, llegándose a obtener la relación entre la entropía y el área de un agujero negro en concordancia con la literatura científica. **Resultados y discusión:** En este trabajo se presenta una deducción de la relación entre la entropía y el área de un agujero negro estacionario, cargado a partir del establecimiento de un baño de radiación de fotones de frecuencia correspondiente a la de los rayos X. **Conclusiones:** En el proceso surgen expresiones matemáticas, poco trabajadas en cursos formales de física a nivel de pregrado, como lo es el polilogaritmo o función de Jonquière presente a lo largo de los desarrollos que siguen, una vez establecidas por primera vez.

Palabras Clave: Entropía, área, agujero negro, rayos X, polilogaritmo.

ABSTRACT

Introduction: It begins with definitions and explanations of concepts involved in the dynamics of black holes. **Materials and methods:** review of the subject is developed based on the fact that the black hole is surrounded by a “sea of photons” created through the process of accretion, reaching to obtain the relationship between entropy and the area of a black hole in accordance with the scientific literature. **Results and discussion:** In this paper, a derivation of the relationship between entropy and area of a stationary black hole, loaded from the establishment of a radiation bath of photons corresponding to the frequency of lightning occurs X. **Conclusions:** In the process mathematical expressions arise shortly worked in formal physics courses at the undergraduate level, as is the polylogarithm function Jonquière or present throughout the developments that follow, once established for the first time.

Keywords: Entropy, Area, Black hole, X rays, polylogarithm.

INTRODUCCIÓN

En esta parte se va a realizar una breve introducción a los conceptos generales que involucra el estudio de la dinámica de los agujeros negros. Para empezar, se puede decir que los agujeros negros son aquellos objetos sorprendentes del universo debido a sus propiedades físicas y las consecuencias que de ellas se desprenden. Y es que su predicción teórica, que data del siglo XVIII cuando John Michell, basado en la teoría newtoniana hizo un experimento mental en el que estaba implícito el concepto de “velocidad de escape”, la cual se determina a partir de la relación:

$$(1) \quad v = \sqrt{\frac{2GM}{R}}$$

Que para la Tierra se calcula en unos 11 km/s. Pero Michell (1783)¹ extrapolar sus resultados llegando a concluir que debe existir una circunferencia crítica para la que la velocidad de escape es igual a la de la luz. Y, de esta manera, habrá una circunferencia para algún tipo de estrellas cuyo valor impide que las partículas de luz puedan escapar de su superficie, lo que les dará una apariencia oscura, por lo que Michell las llamó estrellas oscuras. Para que tal situación se dé, habría que reemplazar v por el valor de la velocidad de la luz (c), así se tiene para las dimensiones espaciales de tales estrellas:

$$R = \frac{2GM}{c^2} \quad (2)$$

Si la estrella fuera el Sol o una con una masa equivalente a la suya, se tendría:

$$R \approx \frac{2 \times 6.67 \times 10^{-11}}{2.99792 \times 10^8} \approx 2.95 \text{ km}$$

Así, la circunferencia del Sol, o de tal estrella, debería ser $C=2\pi R \approx 18.5 \text{ km}$. Imaginarse el Sol contenido en una circunferencia de este tamaño es asombroso, es aproximadamente 236263.78 veces menor que su valor real.

Pero fue Karl Schwarzschild (1916)¹ quien halló una fundamentación teórica para tales cuerpos al estudiar la recién desarrollada Teoría General de la Relatividad de Einstein. Tal trabajo describe el campo gravitacional de objetos compactos, esféricos y estáticos, y predice que para cada estrella existe una circunferencia crítica que depende de la masa de la estrella.

Con el aporte de Schwarzschild se define a un agujero negro como un objeto en el que las cosas pueden caer, pero del que nada puede escapar. Y de esta definición

se llega a otra muy importante a la hora de entender la dinámica de los agujeros negros que es la de Horizonte de eventos o radio de Schwarzschild que se entiende como la superficie de un agujero negro; el punto de no retorno, traspasado el cual nada puede salir. Sin embargo esta definición no hay que confundirla con la de Horizonte aparente que es la posición más externa en torno a un agujero negro, donde los fotones, que tratan de escapar son atraídos hacia el centro¹.

Se habla de agujero negro cuando el tamaño de un objeto de masa M llega a ser más pequeño que su radio de Schwarzschild (o gravitacional)

$$r_s \approx \frac{2GM}{c^2} \quad (3)$$

Un importante avance en el estudio de los agujeros negros se debe a Roy Kerr que en 1963 planteó un soporte teórico válido para describir el campo gravitacional de un agujero negro estacionario que rota. Tal agujero también tiene el radio gravitacional que describe el Horizonte de eventos. Aunque esta nueva propuesta tiene una característica que no había sido tomada en cuenta antes que es el efecto de “tragar”, al rotar, la materia que circunda al agujero.

Y fue hasta 1967 que se acuñó el nombre de agujero negro por parte de John A. Wheeler. Fueron muchos los avances en física de agujeros negros en la segunda mitad del siglo XX, entre los cuales se hallan los referentes a su búsqueda. Con respecto a tal investigación, si el agujero negro está en un sistema binario con otra estrella visible, a través del movimiento se puede obtener un límite para la masa de la estrella invisible. Si excede a dos masas solares, es un candidato a agujero negro². En un sistema tal, debido a la atracción gravitacional y a la rotación, el gas de la estrella fluye por una zona pequeña de su atmósfera, localizada precisamente frente al agujero negro, y no cae directamente en éste sino que gira a su alrededor formando un disco de acreción, en el que el gas se llega a calentar tanto, poco antes de caer en el agujero negro, que emite rayos X³.

Hay que hacer notar que la formación de un disco de acreción no es señal fiel de la existencia de un agujero negro, pues la existencia de una estrella de neutrones también los puede producir³. Por ejemplo, en Cignus X-1 hay una estrella supergigante con un acompañante es un agujero negro. Si se asume que la masa de la supergigante es de unas 20 masas solares, la masa de la compañera resulta ser mayor de 5 masas solares, por lo cual ha de ser un agujero negro, no una estrella de neutrones⁴.

En un estudio relativamente nuevo se ha concluido que “existe toda una población de agujeros negros de masa intermedia que, además, suelen encontrarse en las galaxias sin bulbo (se entiende por bulbo galáctico a la protuberancia que se debe al grupo central de estrellas que se encuentran en la mayoría de galaxias

espirales). No obstante, no parece que esta clase de objetos abunde en el universo: solo una de cada 2.000 galaxias lo bastante brillantes como para poder estudiarlas presenta indicios de un agujero negro activo de masa intermedia⁵.

De la misma manera, parece existir un agujero negro supermasivo, de unos 4.5 millones de masas solares, en el centro de nuestra galaxia. Se cree que casi todas las galaxias gigantes albergan en su centro un inmenso agujero negro. Y esta búsqueda implicaba el trabajo de la astronomía óptica (que utiliza la luz), mientras que había otros avances en el campo de la radioastronomía, por ejemplo, que utiliza otra parte del espectro electromagnético, diferente a la luz, para hacer sus búsquedas. A comienzos de los años ochenta se obtenían imágenes de los núcleos de las radiogalaxias y los cuásares, con resoluciones que superaban en unas 1000 veces las de los instrumentos ópticos.

En el año 1970 Stephen Hawking demostró que el área del Horizonte del agujero negro que se forma en una colisión de dos de ellos es mayor que la suma de las áreas de los horizontes iniciales, o dicho en otras palabras, lo que demostró fue que el radio de Schwarzschild nunca puede decrecer. Y la razón física de que esto suceda es sencilla: cualquier cosa que tropieza con un agujero emite energía hacia el interior a través de su horizonte absoluto, y no hay manera de que ninguna energía pueda regresar. Puesto que toda forma de energía produce gravedad, esto significa que la gravedad del agujero se está reforzando continuamente y, por tanto, el área de su superficie está creciendo continuamente. De todo esto surge el teorema del área de Hawking: en cualquier proceso dinámico que involucre agujeros negros, el área total de todos los horizontes no puede decrecer en el tiempo. Este teorema implica que, mientras dos agujeros negros pueden colisionar y fundirse, un único agujero nunca puede bifurcarse espontáneamente en dos más pequeños⁶. El mismo Hawking notó la semejanza entre esta ley del área y la segunda ley de la termodinámica, según la cual “para sistemas que interactúan de alguna manera (estén o no en equilibrio) la entropía del sistema combinado no puede decrecer”⁷.

Asimismo, Jacob Bekenstein creía que el área de un agujero negro estaba directamente relacionada con su entropía. Siendo así, para hacer cumplir la segunda ley, que un agujero negro debe poseer una entropía que aumente, se halla la relación entropía – área de la superficie de un agujero negro. Para 1972 James Bardeen, Brandon Carter y Stephen Hawking se unieron para buscar las leyes que gobiernan la dinámica de los agujeros negros, las que se conocen como leyes de la mecánica de los agujeros negros, que mantienen un gran parecido con las leyes de la termodinámica. Cada ley de los agujeros negros resultaba ser idéntica a una ley

de termodinámica al tener en cuenta las “equivalencias” entre “área del horizonte” – “entropía”, y “gravedad en la superficie” – “temperatura”.

En 1971 Zeldovich fue el primero en sugerir que los agujeros negros en rotación deben radiar ondas gravitacionales, en analogía con una esfera metálica en rotación que rota emite radiación electromagnética. Posteriormente Hawking demostró que un agujero negro en rotación debe radiar y frenar su giro, fenómeno que aún no ha sido observado. Del mismo modo, predecía que el espectro de la radiación es exactamente igual al espectro de la radiación térmica de un cuerpo caliente, lo que ponía de manifiesto que su horizonte tuviera una temperatura finita que es proporcional a la gravedad en la superficie del agujero (aquí hay que introducir un nuevo concepto que es el de gravedad de superficie, la que se entiende como la intensidad de la atracción gravitatoria que siente un observador en reposo exactamente sobre el horizonte de un agujero negro). Esto confirmaba que los agujeros negros tenían una entropía que es proporcional al área de su superficie.

La emisión se puede entender de la siguiente manera. La mecánica cuántica implica que la totalidad del espacio está lleno de pares de partículas y antipartículas “virtuales” que se están materializando constantemente en pares, separándose y luego juntándose una vez más y aniquilándose entre sí (estas partículas se llaman “virtuales” porque, al contrario de las reales, no se pueden observar directamente en un detector de partículas). Una de las partículas puede cruzar el horizonte de eventos del agujero negro y adquiere energía negativa y la otra partícula, con energía igual y opuesta, escapará del agujero del todo: será emitido⁸.

Conforme un agujero negro emite partículas su masa y tamaño decrece a un ritmo constante hasta llegar a evaporarse. Para agujeros negros muy grandes el tiempo para que esto suceda es bastante grande: a un agujero negro con la masa del Sol le tomará unos 10 años⁶⁶. Por otro lado para un agujero negro primordial, con una masa de aproximadamente una masa terrestre, el tiempo ha de ser de unos 10 mil millones de años⁹. Así, según el tipo de agujero negro será su tiempo de evaporación, puesto que existe una clasificación de agujeros negros en astrofísica que solo se van a nombrar en este artículo: primordiales, estelares, los de masa intermedia, los de alto corrimiento al rojo y los supermasivos¹⁰.

Ahora, habiendo hecho una rápida introducción histórica y de algunos conceptos básicos, se va a nombrar las leyes de la mecánica de los agujeros negros. Inicialmente se hace una descripción breve de las leyes de la termodinámica:

Ley Cero: Todas las partes de un sistema en equilibrio termodinámico tienen igual temperatura.

Primera ley: La variación infinitesimal de la energía interna de un sistema con temperatura T a presión P se relaciona la variación de entropía dS y la variación de presión dP por : $dU = TdS - PdV$.

Segunda ley: La entropía nunca puede decrecer $dS \geq 0$.

Tercera ley: Esta ley refleja la imposibilidad de acceder al cero absoluto de temperatura, es decir, es imposible reducir la temperatura de un sistema a cero por un número finito de procesos.

En la mecánica de los agujeros negros estas leyes son:

Ley Cero: Todas las partes del horizonte de eventos de un agujero negro en equilibrio tienen la misma gravedad de superficie K . La gravedad de superficie se relaciona con la temperatura física del agujero negro (temperatura de Hawking) por:

$$T_H = \frac{\kappa}{2\pi} \quad (4)$$

Que para un agujero negro descrito por Schwarzschild es la relación dada por [5], la cual no se va a demostrar puesto que el presente artículo tiene otras perspectivas,

$$(5) \quad T_H = \frac{\hbar}{8\pi G k_B M} \approx 6.20 \times 10^{-8} \frac{M_\odot}{M} K$$

Donde M_\odot es igual a una masa solar (1.98×10^{30} kg). Y para un agujero negro rotante de Kerr es (6):

$$T_H = \frac{\hbar}{2\pi k_B} = 2 \left(1 + \frac{M}{\sqrt{M^2 - a^2}} \right)^{-1} \frac{\hbar}{8\pi M k_B} < \frac{\hbar}{8\pi M k_B}$$

Siendo $a=J/M$. Para un agujero negro cargado que no rota de "Reissner - Nordström" se tiene (7):

$$T_H = \frac{\hbar}{2\pi k_B} = \left(1 - \frac{Q^2}{r_+^4} \right)^{-1} \frac{\hbar}{8\pi M k_B} < \frac{\hbar}{8\pi M k_B}$$

Siendo que la carga eléctrica reduce la temperatura de Hawking. Como aclaración vale la pena decir que la radiación de Hawking no juega un papel importante en el caso de agujeros negros de gran tamaño. El único tipo de agujero negro donde se puede esperar observar tal radiación es en los llamados mini agujeros negros, que se cree han existido en el principio del universo. En esta última expresión r_+ hace referencia al radio del horizonte concéntrico externo, puesto que en un agujero negro cargado, a diferencia de uno neutro, hay dos horizontes concéntricos, centrados alrededor de la singularidad

(una región del espacio-tiempo donde la curvatura del espacio tiempo se hace tan fuerte que las leyes de la relatividad general dejan de ser válidas y son sustituidas por las leyes de la gravedad cuántica)

$$r_{\pm} = \frac{GM}{C^2} \pm \sqrt{\frac{G^2 M^2}{C^4} - \frac{GQ^2}{C^4}}$$

En la que hay que tener en cuenta que un observador externo solo puede ver lo que sucede afuera del horizonte externo. También hay que aclarar que Q es la carga eléctrica del agujero y M es su masa.

Primera ley: La variación infinitesimal de la masa M , la carga Q y la cantidad de movimiento angular J de un agujero negro estacionario de Kerr - Newman, perturbado se relacionan por:

$$dM = \frac{\kappa}{8\pi} dA + \Omega_H dJ + \Phi_H dQ \quad (8)$$

Siendo Ω_H y Φ_H la velocidad angular del agujero y el potencial eléctrico, respectivamente,

$$\Omega_H = \frac{\partial M}{\partial J} \quad (9)$$

$$\Phi_H = \frac{\partial M}{\partial Q} \quad (10)$$

Segunda ley: El área del horizonte de eventos nunca puede decrecer. $dA \geq 0$.

Como ya se dijo, esta ley es una consecuencia directa del teorema de área de Hawking. Esta ley se viola si se toman en cuenta los efectos cuánticos, es decir, que el área del horizonte de eventos se puede reducir por la radiación de Hawking.

Tercera ley: Es imposible reducir la gravedad de superficie a cero por un número finito de operaciones.

Es claro que el área del horizonte de eventos juega el papel de una entropía, mientras que la gravedad de superficie juega el papel de una temperatura. Sin embargo, como lo postuló Bekenstein, si el agujero negro tuviera una temperatura real como en los sistemas termodinámicos, radiarían energía, en contradicción a su definición básica¹¹.

DESARROLLO

Se parte del hecho de que al caer materia a un agujero negro ésta es observable solo mediante la emisión de radiación X (compuesta de un mar de fotones)

durante la caída, y que debido a los efectos de marea que disocia esta materia hasta hacerle perder su identidad queda solo en forma remanente la masa, la carga eléctrica y la cantidad de movimiento angular total. Además de estas tres propiedades el agujero negro no preserva ningún otro detalle del objeto que colapsó. Esta conclusión, conocida como el teorema “un agujero negro no tiene pelo” fue probado inicialmente por Brandon Carter, Werner Israel, David C. Robinson y Stephen Hawking.

Puesto que, debido a la linealidad de las ecuaciones de la electrodinámica, los fotones no interactúan entre sí, es aceptable considerar al “gas fotónico” como uno perfecto. De esta manera dicho gas obedecería la estadística de Bose¹².

Cuando un fotón tiene suficiente energía, puede ser absorbido en la materia y producir un par de partículas cargadas opuestamente. El proceso de conversión mejor conocido se refiere a la producción de pares, que involucra la creación de un par positrón – electrón y la desaparición de un fotón¹³. Para que ocurra el proceso fotón → electrón + positrón ($\gamma \rightarrow e^- + e^+$), el fotón debe interactuar con un campo externo como el campo de Coulomb para absorber algo de su cantidad de movimiento¹⁴, por lo que valdrá asumir agujeros negros cargados eléctricamente posteriormente, que se describen por la métrica de Reissner – Nordström (RN),

$$(11) \quad ds^2 = - \Delta c^2 dt^2 + \Delta^{-1} dr^2 + r^2 d\Omega^2$$

Siendo:

$$(12) \quad \Delta = 1 - \frac{2GM}{c^2 r} + \frac{G(Q^2 + P^2)}{c^4 r^2}$$

En esta expresión, M se interpreta como la masa del agujero; Q es la carga eléctrica total, y P es la carga magnética total¹⁵.

La distribución espectral de los fotones ha de estar gobernada por la ley de Planck:

$$(13) \quad dE_\omega = \frac{V \hbar}{\pi^2 c^3} \frac{\omega^3 d\omega}{e^{(h\omega/T)} - 1}$$

Con $\omega = 2\pi\nu$, siendo ν la frecuencia de los fotones.

Integrando para la energía se llega a:

$$(14) \quad E = \frac{V \hbar}{\pi^2 c^3} \left(-\frac{1}{4} w^4 + \frac{T w^3 \ln(1 - e^{-hw/T})}{h} + \frac{3 T^2 w^2 Li_2(e^{-hw/T})}{h^2} - \frac{6 T^3 w Li_3(e^{-hw/T})}{h^3} + \frac{6 T^4 w Li_4(e^{-hw/T})}{h^4} \right)$$

En la que aparece la función logaritmo de alto orden, que se llama, genéricamente, **polilogaritmo o función de Jonquière**. Estrictamente hablando este nombre se da a funciones $Li_n(z)$ definidas por¹⁶:

$$Li_n(z) = \frac{z}{1^n} + \frac{z^2}{2^n} + \frac{z^3}{3^n} + \dots \sum_{k=1}^{\infty} \frac{z^k}{k^n} \quad (15)$$

Esta es una función definida en el plano complejo sobre el disco abierto unitario. Siendo los fotones partículas bosónicas, para un gas de Bose degenerado, se tiene para la entropía¹⁷:

$$(16) \quad S = \frac{5E}{3T}$$

Así, se llega a la relación para la entropía del gas de fotones, alrededor del agujero negro, en función de funciones polilogarítmicas (17):

$$S = \frac{5V}{3\pi^2 c^3} \left(-\frac{\hbar}{4T} w^4 + w^3 \ln(1 - e^{hw}/T) + \frac{3 T^2 w^2 Li_2(e^{hw}/T)}{h} - \frac{6T^2 w Li_3(e^{hw}/T)}{h^2} + \frac{6T^3 w Li_4(e^{hw}/T)}{h^3} \right)$$

Que está en función solo de funciones polilogarítmicas. Utilizando la relación [7] para la temperatura física de un agujero negro de "Reissner - Nordström" se llega a (18):

$$S = \frac{5r_+^4 V}{8\pi^3 M k_B (r_+^4 - Q^4) c^3} \left[w^2 Li_2 \left(\exp \left(\frac{8\pi M k_B (r_+^4 - Q^4)}{r_+^4} \right) \right) - \frac{2r_+^2 w Li_3 \left(\exp \left(\frac{8\pi M k_B (r_+^4 - Q^4)}{r_+^4} \right) \right)}{8\pi M k_B (r_+^4 - Q^4)} + \right. \\ \left. \frac{2r_+^3 Li_4 \left(\exp \left(\frac{8\pi M k_B (r_+^4 - Q^4)}{r_+^4} \right) \right)}{64\pi^2 M^2 k_B^2 (r_+^4 - Q^4)^2} \right] - \frac{5V}{3\pi^2 c^3} \left[\frac{w^4 (r_+^4 - Q^4)}{32r_+^4 \pi M k_B} - w^3 \ln \left(1 - \exp \left(\frac{8\pi M k_B (r_+^4 - Q^4)}{r_+^4} \right) \right) \right]$$

Asumiendo una distribución esférica alrededor del agujero negro envolviendo un volumen $V = \frac{4}{3} \pi r_+^3$, que rodea una superficie $A = 4\pi r_+^2$, se tiene (19):

$$S = \frac{5r_+^5 A}{24\pi^3 M k_B (r_+^4 - Q^4) c^3} \left[w^2 Li_2 \left(\exp \left(\frac{8\pi M k_B (r_+^4 - Q^4)}{r_+^4} \right) \right) - \frac{2r_+^2 w Li_3 \left(\exp \left(\frac{8\pi M k_B (r_+^4 - Q^4)}{r_+^4} \right) \right)}{8\pi M k_B (r_+^4 - Q^4)} + \right. \\ \left. \frac{2r_+^3 Li_4 \left(\exp \left(\frac{8\pi M k_B (r_+^4 - Q^4)}{r_+^4} \right) \right)}{64\pi^2 M^2 k_B^2 (r_+^4 - Q^4)^2} \right] - \frac{Ar_+}{9\pi^2 c^3} \left[\frac{w^4 (r_+^4 - Q^4)}{32r_+^4 \pi M k_B} - w^3 \ln \left(1 - \exp \left(\frac{8\pi M k_B (r_+^4 - Q^4)}{r_+^4} \right) \right) \right]$$

Agrupando para A se tiene (20):

$$S = \left\{ \frac{5r_+^5}{24\pi^3 M k_B (r_+^4 - Q^4) c^3} \left[w^2 Li_2 \left(\exp \left(\frac{8\pi M k_B (r_+^4 - Q^4)}{r_+^4} \right) \right) - \frac{2r_+^2 w Li_3 \left(\exp \left(\frac{8\pi M k_B (r_+^4 - Q^4)}{r_+^4} \right) \right)}{8\pi M k_B (r_+^4 - Q^4)} + \right. \right. \\ \left. \left. \frac{2r_+^3 Li_4 \left(\exp \left(\frac{8\pi M k_B (r_+^4 - Q^4)}{r_+^4} \right) \right)}{64\pi^2 M^2 k_B^2 (r_+^4 - Q^4)^2} \right] - \frac{r_+}{9\pi^2 c^3} \left[\frac{w^4 (r_+^4 - Q^4)}{32r_+^4 \pi M k_B} - w^3 \ln \left(1 - \exp \left(\frac{8\pi M k_B (r_+^4 - Q^4)}{r_+^4} \right) \right) \right] \right\} A$$

Que es de la forma:

$$(21) \quad S = f(r_+, M, Q, w) A$$

Siendo $f(r_+, M, Q, w)$ una función de tipo polilogarítmico.

Con este resultado se ha obtenido una relación directa entre la entropía S y el área del agujero negro A , lo que está en concordancia con la entropía de Bekenstein – Hawking¹⁸:

$$S^H = \frac{A}{4l_{Pl}^2} \quad (22)$$

En la que la longitud de Planck está dada por:

$$(23) \quad l_{Pl} = \frac{\hbar G}{C^3}$$

CONCLUSIONES

Se ha obtenido una relación entre la entropía de un agujero negro y el área de un agujero negro estacionario, cargado descrito por la métrica de Reissner – Nordström. Esta relación es directa como lo establece la teoría de la dinámica de los agujeros negros y su obtención ha sido un tanto elemental, no se ha recurrido a la Teoría Cuántica de Campos (TCC) como se hace a la hora de entender este tipo de sistemas extremos.

Además, las relaciones que se han obtenido son dependientes de un tipo de función que no es muy utilizada, pero sí importante, en ciencias a nivel de carreras de pregrado, como lo es la función polilogaritmo o función de Jonquière.

APÉNDICE

Algunos apuntes de la Función Polilogaritmo.

En la expresión [14] aparece la función polilogaritmo, $Li_s(z)$, que se define por [A1]:

$$Li_s(z) = \frac{z}{r(s)} \int_0^1 [\log(1/t)]^{s-1} \frac{dt}{1-zt} = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{z^n}{n^s}$$

Con las siguientes propiedades:

a) $Li_s(z=1) = \zeta(s)$ [A2]

b) Relación de recurrencia:

$$z \frac{d}{dz} Li_{s+1}(z) = Li_s(z) \quad [A3]$$

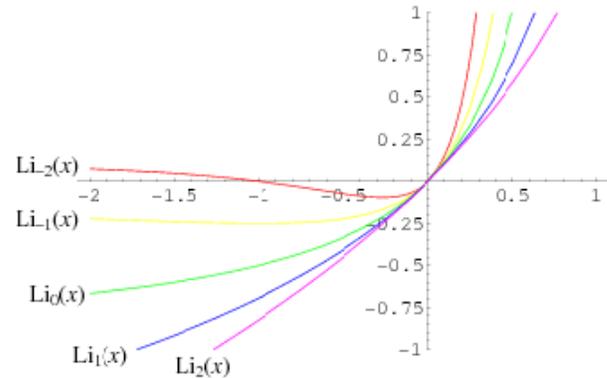
c) Relación de Duplicación:

$$Li_s(z) + Li_s(-z) = 2^{1-s} Li_s(z^2) \quad [A4]$$

d)

$$Li_n(s) = \begin{cases} \zeta(n) & \text{si } n > 1 \\ \infty & \text{si } n \leq 1 \end{cases} \quad [A5]$$

Como se ve de estas propiedades, un polilogaritmo de orden entero llega a ser una función ζ de Riemann del mismo orden cuando su argumento alcanza la unidad. La gráfica de este tipo de funciones es de la forma:



Fuente: Wolfram Math World¹⁹.

AFILIACIÓN

Docente de la SED Bogotá
Estudiante de Maestría en Didáctica de las Ciencias (Universidad Autónoma de Colombia).

BIBLIOGRAFÍA

1. Thorne, K. S. Agujeros negro y tiempo curvo. El escandaloso legado de Einstein. Crítica, Barcelona, 1995.
2. Cheng, T. P. Relativity, gravitation and cosmology. A basic introduction. Oxford University Press, Oxford, 2005.
3. Hacyan, S. Los hoyos negros y la curvatura del espacio – tiempo. Fondo de Cultura Económica, México, 2008.
4. Sepúlveda, S. A. Bases de astrofísica. Universidad

de Antioquia. Medellín, 2014.

5. Greene, J. E. Agujeros negros de masa intermedia. *Investigación y Ciencia* 2012, 26-31.

6. Schutz, B. *A first course in general relativity*. Cambridge University Press. Cambridge, 2009.

7. Stowe, K. *An introduction to thermodynamics and statistical mechanics*. Cambridge University Press. Cambridge, 2007.

8. Ryder, L. *Introduction to general relativity*. Cambridge University Press. Cambridge, 2009.

9. Hawking, S. The quantum mechanics of black holes. *Scientific American Inc.* 1976, 34-41.

10. Camenzind, M. *Compact objects in astrophysics. White dwarfs, neutron stars and black holes*. Springer. Heidelberg, 2007.

11. Luminet, J. P. *Black holes: A general introduction*. Disponible en <http://arxiv.org/pdf/astro-ph/9801252.pdf>. Recuperado el 1 de marzo de 2013.

12. Guénault, T. *Statistical physics*. Springer. Dordrecht, 2007.

13. Das, A., & Ferbel, T. *Introduction to nuclear and particle physics*. Wiley. New York, 1994.

14. Zettili, N. *Quantum mechanics. Concepts and applications*. Wiley. United Kingdom, 2009.

15. Carroll, S. *Spacetime and geometry. An introduction to general relativity*. Addison Wesley. San Francisco, 2004.

16. Lewin, L. *Polylogarithms and associated functions*. North Holland. New York, 1981.

17. Landau, L. D., & Lifshitz, E. M. *Física estadística*. Reverté. Barcelona, 1964.

18. Frolov, V. P., & Novikov, I. D. *Black hole physics. Basic concepts and new developments*. Kluwer Academic publishers, 1997.

19. WolframMathWorld. Polylogarithm. Recuperado el 6 de marzo de 2013 de <http://functions.wolfram.com/ZetaFunctionsandPolylogarithms/PolyLog/>.

Innovaciencia 2014; 2 (1): 38 - 49

CONTROL DEL ACARO EN LA PRODUCCIÓN DE JAMÓN IBÉRICO

MITE CONTROL IN PRODUCTION OF IBERIAN HAM

*José Félix Ortiz Lemus.*¹

Cómo citar este artículo: Ortiz Lemus, JF. Control del acaro en la producción de Jamón Ibérico. Innovaciencia facultad cienc. exactas fis. naturales. 2014; 2(1): 38 - 49

Artículo recibido el 07 de mayo de 2014 y aceptado para publicación el 16 de agosto de 2014

RESUMEN

Los ácaros, pertenecientes al orden "Astigmata", son uno de los problemas más importantes que afectan a la industria cárnica dedicada a la fabricación de productos secos y curados, principalmente al jamón, ocasionando incalculables pérdidas económicas en este renglón de la economía. Considerados una plaga, ocasionan alteraciones organolépticas e incluso la putrefacción del producto, además de ser fuente potencial de bacterias alterantes y/o patógenas. De esta forma, el control de los ácaros debe suponer el uso de un método que permita controlar su actividad o erradicarlos, sin embargo, se debe tener en cuenta la naturaleza de estos productos cárnicos para evitar causar alteraciones físicas, químicas u organolépticas al producto final o ir en contra del proceso de elaboración del Jamón.

Palabras clave: ácaros, jamón Ibérico, maduración, plaga, denominación de origen.

ABSTRACT

The mites, belonging to the order "Astigmata", are one of the most important problems that affect the meat industry dedicated to the manufacture of products dry and cured, mainly to the ham, causing incalculable economic losses in this line of the economy. Considered pests, causes organoleptic alterations and even putrefaction of the product as well as being potential source spoilage and pathogenic bacteria. In this way, the mite control must involve the use of a method that allowed controlling their activity or eradicating them, however, it must take into account the nature of these meat products to avoid causing physical alterations, chemical or organoleptic to the final product or go against the process of elaboration of the ham.

Keywords: mites, Iberian ham, ripening, pest, designations of origin.

INTRODUCCIÓN

El jamón curado, ha adquirido el estatuto de alimento de máxima calidad, amparado actualmente por sus correspondientes Denominaciones de Origen (DO), siendo España e Italia los mayores productores del mismo.¹ La mayor parte de la producción y consumo de jamón curado se localiza en Europa, donde la producción de jamón curado,

1. Microbiólogo. Profesor Titular. Universidad de Pamplona. Grupo de investigación en Biotecnología y Microbiología GIMBIO. Correspondencia: josefelix@unipamplona.edu.co

se caracteriza por su gran diversidad y variedad.² En España, el jamón es un producto premio a la excelencia gastronómica, especialmente, el jamón ibérico de bellota. Países como Francia, Alemania o Japón ya lo han descubierto; los más famosos y apreciados, los de Dehesa de Extremadura, Guijuelo y Huelva que cuentan con DO y Consejo Regulador que certifica su elaboración y calidad.

El proceso de elaboración del jamón ibérico consta de cuatro etapas clásicas: salado, post-salado, secado y maduración, precedido de una fase previa de perfilado (acondicionamiento), que incluye la preparación, selección y clasificación de la materia prima, en su conjunto e influenciada por el tipo de proceso tecnológico o artesanal, permiten obtener un producto estable y duradero.³ Durante este largo proceso, especialmente, durante las dos últimas etapas, el jamón se ve expuesto a multitud de variables que van a determinar, en gran medida la calidad del producto final y consecuentemente su valor económico en el mercado.⁴⁻⁹

Los ácaros dentro de la producción de alimentos, especialmente, aquellos que requieren de maduración o son almacenados a granel, son considerados una plaga.¹⁰⁻¹⁶ En los productos almacenados se han identificado diferentes especies pertenecientes a las órdenes Astigmata, Cryptostigmata, Prostigmata y Mesostigmata. La primera de estas, contiene las especies de mayor incidencia económica, al infestar una amplia gama de alimentos almacenados, tales como, granos, frutos secos, queso, carne y derivados cárnicos, entre otros.¹⁷⁻¹⁹ Además, su presencia en alimentos, es asociada con problemas higiénico-sanitarios al ser agentes causantes de alergias y vehículos transmisores de diversos microorganismos alterantes y/o patógenos.²⁰⁻²⁷

Los ácaros son una plaga en la elaboración de alimentos cárnicos curados y uno de los principales problemas sanitarios a controlar en jamón y otros productos como la cecina.²⁸⁻²⁹ La primera especie acárida identificada en el jamón curado, corresponde a

Tyroborus lini.³⁰ Posteriormente, se han identificado más de una decena de especies en los principales centros productores de jamón.²⁹ Sin embargo, las especies más representativas y predominantes en este producto son: *Tyrophagus putrescentiae*, *Tyrophagus longior* y *Tyrollichus casei*.^{29,31}

Las condiciones ecológicas de temperatura y humedad que se mantienen en la elaboración del jamón, especialmente, durante las etapas de secado y curado en bodega, favorecen el desarrollo de los ácaros y potencian su proliferación, por la presencia de determinadas especies fúngicas que predominan durante estas etapas, principalmente pertenecientes a los géneros, *Penicillium*, *Aspergillus* y *Eurotium*, al constituirse como una fuente de alimento altamente apetecible para los ácaros.³²⁻³⁴ Como consecuencia de la masiva proliferación de los ácaros sobre este producto, se forma una fina capa de polvo, comúnmente denominada "piojillo", de color ligeramente amarillo y textura sedosa, compuesta por ácaros vivos en todos los estadios de su ciclo evolutivo, cadáveres, detritus y mohos, con gran capacidad alergénica, que constituye la principal fuente de contagio.^{20,21,23,35}

CONTROL DE LOS ÁCAROS DEL JAMÓN

El método elegido en el control de los ácaros, debe ser efectivo y aplicable a la tecnología empleada en la elaboración del jamón.^{29,36}

Métodos preventivos

Los métodos preventivos se fundamentan en medidas enfocadas a la elaboración de estos productos, bajo condiciones de higiene que impidan a toda costa la contaminación del producto por agentes externos, como microorganismos alterantes y/o patógenos, ácaros e insectos.^{37,38} Los de mayor relevancia se recogen en la tabla 1.

Tabla 1. Métodos preventivos para el control de los ácaros en jamón.

Método	Medidas de control	Efecto
Higiene y desinfección	Higiene y desinfección de las instalaciones, utensilios y personal. ³⁸	Evitar la entrada y diseminación de los ácaros en la planta de producción.
Diseño de la fábrica	Diseño de las zonas de producción. ³⁸	Facilitar la limpieza y desinfección. Evitar la contaminación cruzada.
Rotación del producto	Producción bajo un sistema lineal y por lotes. ³⁹	Impedir la contaminación cruzada.
Medidas profilácticas	Recubrimiento de la carne con manteca de cerdo o aceite. ^{29 40}	Capa de protección frente a los ácaros, evitando la colonización del producto al tapar los agujeros de la carne.
	El cepillado del producto. ³⁸	Aminorar la cantidad de ácaros sobre cada pieza de carne.
	Flameado de las piezas. ³⁸	Elimina los ácaros que se hallan en la superficie de las piezas.

Tabla 2. Métodos físicos para el control de los ácaros en jamón

Método	Medidas de control	Efecto
Luz e infrarrojos	Exposición a fuente lumínica. ³⁶	Repele los ácaros debido al carácter lucífugo de estos.
Temperatura Alta	Exposición del producto contaminado a una fuente de calor (húmedo o seco). ³⁶	Destruye los ácaros pero ocasiona graves daños al producto, alterando las grasas y proteínas cárnicas.
Congelación y refrigeración	Mantenimiento de las piezas contaminadas a una temperatura de congelación (-28 °C) o refrigeración (4 °C). ^{36 41}	Destruye las formas móviles de los ácaros, más no, los huevos.
La refrigeración sólo retrasa el crecimiento de los ácaros.	Recubrimiento de la carne con manteca de cerdo o aceite. ^{29 40}	Capa de protección frente a los ácaros, evitando la colonización del producto al tapar los agujeros de la carne.
En ambos casos se ocasionan graves daños al producto.	El cepillado del producto. ³⁸	Aminorar la cantidad de ácaros sobre cada pieza de carne.
Ultravioleta	Exposición del producto contaminado a una fuente de emisión de rayos UV-C. ³⁹	Muerte de todos los estadios del ciclo biológico del ácaro, es muy complejo y costoso de instalar.
Energía ionizante	Exposición del producto contaminado a una fuente de energía ionizante (cobalto). ³⁶	Destrucción del 100 % de todos los estadios del ciclo biológico del ácaro. Modifica las características organolépticas del producto y su uso está prohibido en España (Real Decreto 348/2001 de 4 de abril),
Microondas	Exposición del producto a una fuente de microondas de elevada potencia y a 60 °C. ³⁶	Efecto acaricida, pero se ocasionan serios daños superficiales al producto tales como alteración de la grasa o cocción de la carne.
Ultrasonidos	Exposición a una fuente sonora. ³⁹	Repele parcialmente los ácaros sobre la superficie del producto. Su mejor efecto es de barrera física evitando la entrada y diseminación de ácaros en la fábrica.
Control termohigrométrico	Control de la T° y HR en el proceso de secado y curado del producto. ⁴²	Repele y disminuye el número de ácaros sobre la superficie del producto. Se ocasionan serios daños al producto.

Métodos físicos

En la tabla 2 se encuentran recogidos los mecanismos físicos que han sido estudiados como una alternativa para el control de los ácaros en jamón. En cualquier caso, el uso y la implantación de cualquiera de los presentes métodos, es costosa, compleja y peligrosa. Además, todos inducen modificaciones en el sabor y el olor del producto.

Métodos químicos

Por lo general, los métodos físicos no son suficientes para el control de los ácaros y otras plagas que afectan a los productos almacenados, por lo tanto, actualmente, el método con mayor eficacia es la aplicación

de plaguicidas (tabla 3). En el caso del jamón, la aplicación de plaguicidas directamente al producto está absolutamente prohibida por la legislación española, por lo cual su empleo está estrictamente dirigido a la desinfección y desinsectación de las instalaciones. Este tratamiento se realiza con las instalaciones sin alimentos y es llevado a cabo por profesionales acreditados, a fin de evitar daños a la salud de los consumidores o afectar al medio ambiente.

Existe una amplia gama de principios activos efectivos y con propiedades acaricidas sobre las especies presentes en el jamón. Entre estos destacan principalmente, piretroides, sustancias organofosforadas, carbamatos, soluciones alcohólicas, desnaturizantes de proteínas, etc, su uso es restrictivo por su toxicidad o falta de normatividad que permita su correcta aplicación.

Otro mecanismo para el control de los ácaros, es la

Tabla 3. Métodos químicos para el control de los ácaros en jamón.

Método		Medidas de control	Efecto
Plaguicidas	Sólidos	Vaciado sanitario y desinfección de las instalaciones con sustancias químicas. ^{38,43}	Eliminación de todos los estadios del ciclo biológico de los ácaros. No son empleados por reglamentación y su alta toxicidad.
	Gaseosos	Vaciado sanitario y desinfección de las instalaciones, cerradas herméticamente, con plaguicidas en estado gaseoso como el Bromuro de metilo. ³⁸	Eliminación de los estadios móviles del ciclo biológico de los ácaros.
	N ₂ O	Mantenimiento de las piezas de carne contaminadas con ácaros bajo una atmósfera controlada. ^{40,44-46}	Se eliminan las formas móviles de los ácaros; sin embargo, los huevos no son eliminados.
	N ₂		No presenta ningún efecto sobre los ácaros.
	CO ₂		Se eliminan las formas móviles de los ácaros, a concentraciones cercanas al 100 %.
CO	Inmoviliza temporalmente las formas móviles de los ácaros.		
Atmosfera modificada	SO ₂	Mantenimiento de las piezas de carne contaminadas con ácaros bajo una atmósfera controlada. ^{40,44-46}	Eliminación de huevos y de las formas móviles de los ácaros. Afecta al producto al oxidar la vitamina B1 y, además, es altamente corrosivo.
	NH ₃		Elimina las formas móviles en poco tiempo, e inactiva los huevos en menos de 12 horas. Causa graves daños en el producto al alterar el sabor y el olor.
	Bajo tensión de O ₂		En combinación una baja humedad relativa, previene el crecimiento de los ácaros, pero genera modificaciones indeseables en el sabor y olor del jamón.

instalación de cámaras de secado y curado con atmósfera modificada, que mediante la gasificación de diferentes compuestos químicos ha mostrado ser, en principio, una alternativa eficaz en la erradicación de la plaga de estos productos. Pese a su eficacia experimental, la posibilidad de ser aplicadas a gran escala, muestra serios inconvenientes por su complejidad y alto costo, además, su uso supone graves riesgos para el medio ambiente y la salud de los trabajadores. ^{44,45}

Control bioquímico

La comunicación entre animales puede ser llevada a cabo mediante el uso de sustancias químicas (feromonas). En conjunto estas sustancias, utilizadas por los seres vivos, constituyen un sistema de comunicación químico, a menudo con un orden jerárquico y con diferentes propósitos (tabla 4).

Este tipo de compuestos son obtenidos de plantas, especialmente las labiadas, árboles y otros vegetales. De su composición suelen formar parte compuestos alifáticos, cromáticos, terpénicos, a veces isocíclicos y heterocíclicos, pudiéndose identificar hidrocarburos (limoneno), alcoholes (linalol, mentol), aldehídos (citril), cetonas (mentona), ácidos (cinámico, valeriano), ésteres (acetato de linalilo) y fenoles (eugenol, timol) entre otros, como principios activos, que han sido estudiados como una alternativa viable en el control de los ácaros causantes de alergias, en productos almacenados y hogares. ^{52,53}

Estudios realizados en España han demostrado que los aceites esenciales como lavanda, tomillo, menta, clavo, melisa, geranio, entre otros, ejercen un potente efecto acaricida por inhalación y/o contacto directo, sobre los ácaros del jamón, lo que hace posible uso como una alternativa en el control de los ácaros en el

Tabla 4. Métodos bioquímicos para el control de los ácaros en jamón.

Método		Medidas de control	Efecto
Feromonas	Neryl formato	Inducen cambios en el comportamiento de los ácaros a fin de ser controlados. ^{39,47,48}	Repele los ácaros temporalmente. Sin embargo, en ambos casos hay alteraciones organolépticas del producto.
	Citral		
Aceites esenciales		Exposición de los ácaros a aceites esenciales como la limón, menta, tomillo, romero, eucalipto, geranio, melisa, clavo y lavanda. ³⁹	Presentan un efecto acaricida superior al 90% al aplicarlo por inhalación.
		Exposición de los ácaros a 13 monopertenos extraídos de aceites esenciales, principalmente los alcoholes carvacrol, timol y linalol. ⁴⁹	El efecto acaricida sobre <i>T. putrescentiae</i> al aplicarlo por contacto directo o inhalación es elevado, sin dañar los huevos.
		Exposición de los ácaros a linalol disuelto en aceite de girasol al 1 % aplicado sobre las piezas de jamón. ⁵⁰	Se observa un efecto acaricida del 100 % y un efecto repelente muy acusado, al aplicarlo sobre piezas de jamón.
		Exposición de los ácaros a aceites esenciales de limón, salvia y clavo. ³⁹	Repele los ácaros.
		Exposición de los ácaros a la 2-heptatona. ³⁹	Atrae los ácaros en un 90%, pudiéndose emplear como cebo en trampas.
	Exposición de los ácaros a compuestos activos obtenidos de aceites esenciales como fenchona, linalol, acetato de linalilo, mentona, terpineol, α y γ -terpineno, amoniaco, 1-octanol, 3,7-dimetil, R-(-)-carvona, M, P y O-cresol, p-anisaldehido, citronellol, cinamic aldeic, aceite de cinnamon, ácido citronélico, eugenol, geraniol. ^{45,51}	Provocan la muerte del 100 % de los individuos móviles, pero no afecta a los huevos.	

jamón curado, dado su carácter atóxico para el alimento y para el consumidor.⁵⁴ Sin embargo, inducen cambios en las características organolépticas del producto, por tanto, podrían usarse como cebos en trampas o como barreras, al atraer y repeler los ácaros, respectivamente.

OTROS COMPUESTOS CON ACTIVIDAD BIOLÓGICA

El control integrado de las plagas busca reducir al máximo la utilización de los plaguicidas sintéticos convencionales, al ser remplazados por metodologías ecológicas. Con este fin se han desarrollado nuevos productos naturales de origen vegetal o microbiano, más selectivos y de menor toxicidad para el medio ambiente.

Compuestos de origen vegetal

Además de los plaguicidas químicos, existen otros compuestos de origen natural y de menor toxicidad, empleados en el control de plagas de diferentes órdenes

de insectos. Entre ellos se encuentran principios activos obtenidos a partir de extractos del árbol del Neem (*Azadirachta indica*).⁵⁵ Algunos de estos compuestos con actividad insecticida y acaricida se recogen en la tabla 5.

Compuestos de origen fúngico y bacteriano.

Ciertas especies de hongos son denominados entomopatógenos por su capacidad para ocasionar enfermedades a diversos insectos y/o nemátodos. Por ejemplo, *Beauveria bassiana* y *Metarhizium anisopliae*, no sólo son los primeros hongos en ser reconocidos como patógenos de insectos, sino que también, son las especies de las cuales se ha estudiado más intensamente los metabolitos secundarios que producen. La principal clase de metabolitos insecticidas producidos por estos hongos, así como por otros, son las destruxinas y depsipéptidos cíclicos.^{62,63} No obstante, ninguno de estos compuestos ha sido desarrollado a nivel industrial, debido al alto costo de su producción. De otra parte, el spinosad es un compuesto conformado

Tabla 5. Compuestos plaguicidas de origen natural (vegetal).

Compuesto	Efecto
Azadiractina ⁵⁶⁻⁵⁸	Plaguicida que actúa como regulador del crecimiento de los estados juveniles de insectos y artrópodos. En dosis altas es antiapetitivo. Usado como acaricida en control de <i>Tetranychus urticae</i>
Piriproxifén ⁵⁹	Interviene en el desarrollo del ácaro, suprimiendo la embriogénesis evitando la formación del estado adulto en el ácaro.
Halofenocida ⁶⁰	Plaguicida. Interfiere en el normal desarrollo del proceso de metamorfosis y reduce la fecundidad en insectos.
Hexaflumurón ⁶¹	Plaguicida. Inhibe la síntesis de quitina en la cutícula de los insectos, además, actúa como ovicida.

por dos metabolitos, la espinosina A y D, producidos por Actinobacteria *Saccharopolyspora spinosa*, es empleado en varios productos agrícolas dirigidos al control de diversos insectos.⁶⁴⁻⁶⁵ En la tabla 6 se recogen algunos de los compuestos con actividad insecticida y nematocida producidos por estos microorganismos.

Tabla 6. Algunos metabolitos producidos por hongos y un actinomiceto con actividad insecticida y nematocida.^{62,63,66-68}

Compuesto	Microorganismo productor	Actividad
Destruixinas	<i>M. anisopliae</i> , <i>Aspergillus ochraceus</i> , <i>Trichothecium roseum</i> <i>Aschersonia</i> spp.	Insecticida, citotóxico, antimicrobiana
Beauverolide	<i>B. bassiana</i> , <i>B. tenella</i> , <i>Isaria</i> spp.	Insecticida
Isariin	<i>Isaria cretacea</i> , <i>I. felina</i>	Insecticida, antimicrobiana
Bassianolide	<i>B. bassiana</i> , <i>Verticillium lecanii</i>	Insecticida
Enniatin	<i>Fusarium</i> spp, <i>Alternaria kikuchiana</i>	Insecticida, antimicrobiana, nematocida
Ác. decanoico	<i>Oudemansilla mucida</i>	Nematocida
Ác. calvático	<i>Calvatia lilacina</i>	Nematocida
Spinosad	<i>Saccharopolyspora spinosa</i>	Insecticida

Sin embargo, también se han identificado metabolitos con actividad insecticida en hongos no patógenos de insectos. Estos son extraídos, principalmente, de cuerpos fructificantes y esclerocios de especies fúngicas pertenecientes a la división Ascomycota, entre otros. Es posible, que la formación de estos compuestos al interior de los cuerpos fructificantes, ejerzan un control biológico sobre los insectos, comportándose como sustancias atrayentes (cebos). Algunos de ellos se recogen en la tabla 7.

Tabla 7. Metabolitos fúngicos con actividad insecticida producidos por hongos no patógenos de insectos.

Compuesto	Hongo productor	Actividad
Ácido iboténico y muscimol	<i>Amanita</i> sp, <i>A. muscaria</i> ⁶⁹	Insecticida
Ácido tricholómico	<i>Tricholoma muscarium</i> . ⁷⁰	Insecticida
Clitocina	<i>Clitocybe inversa</i> ⁷¹	Insecticida
Isovelleral	<i>Lactarius</i> sp. ⁷²	Insecticida
Lolitrem B, ergovalina y peramine	<i>Acremonium</i> sp, <i>Epichloe</i> sp. ⁷³	Insecticida
Shearimide	<i>Eupenicillium shearii</i> . ⁷⁴	Insecticida
NK374200	<i>Talaromyces</i> sp. ⁷⁵	Insecticida
Chaetochalasin A	<i>Chaetomium brasiliense</i> . ⁷⁶	Insecticida
Tubingensina A, leporin A y carbonarins C, Nominine.	<i>Aspergillus</i> sp. ⁷⁷	Insecticida
Okaramines A	<i>Penicillium simplicissimum</i> . ⁷⁸	Insecticida
Ocratoxina A	<i>Aspergillus carbonarius</i> . ⁷⁹	Insecticida
Brevioxima.	<i>Penicillium brevicompactum</i> . ⁸⁰	Antifúngico e insecticida

CONTROL BIOLÓGICO

Esta metodología proporciona enormes ventajas debido a su especificidad y a la ausencia de riesgos de toxicidad y de otros efectos ambientales indeseables derivados del empleo de plaguicidas químicos.⁸¹ Sin embargo, su aplicación en el control de las plagas de los productos almacenados, presenta varios inconvenientes.

El control de los ácaros por sus enemigos naturales, generalmente, comienza cuando ya se han producido daños serios en el producto a proteger, aunque puede variar si los enemigos naturales son liberados en los primeros estadios de la infestación.⁸² Otro problema asociado a este tipo de metodología radica en el hecho de que la introducción de enemigos naturales puede incrementar la contaminación del producto.⁴³

Ácaros predadores

Las principales especies predatoras de los ácaros que infectan los productos almacenados pertenecen a los órdenes Mesostigmata y Prostigmata.⁸³ De todas ellas, el prostigmátido *Cheyletus eruditus* ha mostrado tener un gran potencial para la predación y control de ácaros Astigmata presentes en grano y semillas almacenadas.^{84,85} Sin embargo, su eficiencia se ve disminuida cuando la densidad de la presa es superior a los 1000 individuos por kilogramo de grano, debido a su limitada capacidad devoradora (5 presas/día, por predador) para erradicar una población tan alta.^{86,87}

Los resultados obtenidos en el control de la plaga del jamón por ácaros predadores, no han sido tan satisfactorios como los obtenidos en el control de los ácaros que atacan el grano. Estos ácaros predadores muestran una capacidad depredadora insuficiente para el control de las poblaciones de ácaros en secaderos de jamón.³⁹

Hongos y bacterias entomopatógenas

Varios estudios han demostrado que la utilización de hongos entomopatógenos puede ser una alternativa al uso de plaguicidas para el control de insectos y aunque estos, en principio, no se desarrollan en las mismas condiciones ecológicas en que se elabora el jamón, pueden llegar a ser manipulados genéticamente y, posteriormente, ser usados para el control de los ácaros.^{62,63}

Algunos, hongos como *Metarhizium anisopliae*, *Hirsutiella thompsonii*,⁸⁸⁻⁹⁰ *Beauveria bassiana*, *Isaria fumorosea*^{91,92} y *Verticillium lecanii*,^{93,94} son usados en el control de plagas de ácaros en productos frutales, hortícolas, cereales, oleaginosas, patata, algodón, tabaco y uva, e incluso en colmenas de abejas.⁹⁵⁻⁹⁸ Además, se ha descrito que ciertas especies fúngicas pertenecientes a los géneros *Sporondema*, *Wallemia*, *Aspergillus*, *Penicillium*, *Claviceps* y *Fusarium*, retardan el desarrollo o son letales para *Acarus siro*, *Tyrophagus putrescentiae* y *Caloglyphus rodriguezi*.^{99,100}

Entre las bacterias, la β -exotoxina (Thuringiensina) producida por *Bacillus thuringiensis*, presenta una actividad acaricida prometedora frente a ácaros como *Tetranychus urticae*, plaga de productos

hortofrutícolas¹⁰¹⁻¹⁰³. Otras bacterias como *Bacillus thuringiensis* var. *israelensis* y *Bacillus sphaericus* aniquilan y retardan el desarrollo del estado tritoinfa del ácaro del polvo casero,¹⁰² *Dermatophagoides pteronyssinus*, causante de un gran número de alergias. Así mismo, la avermectina, doramectina y nemadectina, producidas por *Streptomyces avermitilis* y *S. microflavus*, presentan actividad acaricida, nematocidas e insecticidas, incluso la primera de ellas, es de uso extensivo y aprobado en Rusia.¹⁰⁴⁻¹⁰⁶

La aplicación de determinados hongos sobre la superficie del jamón, puede constituir una herramienta útil en el control de los ácaros. Varios trabajos han demostrado que ciertas especies fúngicas predominantes en las últimas etapas de elaboración de estos productos muestran diferente actividad frente a los ácaros. Se ha comprobado en laboratorio, que el desarrollo de *T. putrescentiae* sobre aislados de *Penicillium spp*, es diez veces más alto que sobre los de *Aspergillus spp*.³⁴ Otros estudios muestran que los ácaros del jamón presentan una mayor atracción alimentaria por *Penicillium viridicatum*, incrementándose la población en un corto periodo de tiempo, al contrario de lo observado sobre *Aspergillus amstelodami* (*Eurotium amstelodami*).^{45,107}

Además, se ha descrito que la presencia de *Aspergillus ruber*, hongo que se aísla como una de las especies fúngicas predominantes durante las etapas de secado y curado en bodega del jamón,^{9,108} se asocia con la eliminación de los ácaros.¹⁰⁹ Sin embargo, hasta el momento ninguno de los anteriores microorganismos y productos han sido empleados para el control de los ácaros del jamón.

CONCLUSIÓN

El control de los ácaros en el jamón de larga curación, se ha afrontado desde diferentes perspectivas que incluyen métodos preventivos y curativos, físicos, químicos, bioquímicos y biológicos. Sin embargo, aún no se dispone de un método completamente eficaz que permita la erradicación de estos artrópodos, en todos sus estadios de desarrollo y que además, sea de fácil aplicación, inocuo para el consumidor y que no ocasione daño alguno en el producto. Por tanto, se puede considerar que el único método aplicable actualmente, sea la prevención mediante la implementación de buenas prácticas de manufactura, la disminución de la humedad relativa y el aislamiento de los secaderos.^{36,38,44}

De otra parte, la erradicación de los ácaros, en los secaderos de jamón, mediante el uso de productos químicos pueden ser una alternativa a considerar, en aquellos casos, donde la proliferación de estos artrópodos, es catalogada como plaga, sin embargo, su aplicación debe llevar a cabo bajo un vacío sanitario en las instalaciones, donde los principios activos más

utilizados son las piretrinas, en función de su escasa toxicidad para el hombre, siendo aplicados por empresas especializadas y por personal acreditado.^{29,38,44,45}

Para evitar la diseminación de la plaga por los secaderos de jamón, una opción, es el uso de sustancias atrayentes o repelentes, sin embargo, su aplicación debe estar precedida, de estudios que aseguren, evitar causar efectos sensoriales en el producto.⁴⁵

El control biológico puede en un futuro no muy lejano, dar la respuesta definitiva en el control de esta plaga, puesto que existe evidencia que demuestra el efecto que puede tener ciertos hongos que se desarrollan de forma natural sobre estos productos y, que son similares a otros descritos con efecto acaricida en productos hortofrutícolas, cereales, entre otros,^{99,100} llegando a ser una alternativa en el control de la actividad o ser una fuente que erradique los ácaros en la producción el jamón.

BIBLIOGRAFÍA

1. Leistner L. Alimentos madurados con hongos. *Fleischwirtschaft* 1987; 1: 38-44
2. De La Puente JA. El comercio del jamón curado: promoción y barreras. *Actas del II Congreso Mundial del Jamón (Conjamón)*. Cáceres 27-29 de Marzo del 2003.
3. Ventanas J, Ruiz J, Córdoba JJ. El jamón curado de cerdo ibérico: descripción del proceso tradicional de elaboración. En: *Tecnología del jamón ibérico*. J. Ventanas (coordinador). Editorial Mundi-Prensa. Madrid. 2001.
4. Núñez F. Flora fúngica en el jamón ibérico y su importancia tecnológica y sanitaria. Tesis Doctoral. Universidad de Extremadura. 1995. Cáceres-España.
5. Núñez F, Rodríguez MM, Aranda E, Martín A, Díaz CM, Bermúdez Elena. Influencia de la población fúngica en la maduración del jamón. *Eurocarne*. 1998; 70: 39-51.
6. Rojas FJ, Jodral M, Gosálvez F, Pozo R. Mycoflora and toxigenic *Aspergillus flavus* in Spanish dry-cured ham. *Int. J. Food Microbiol.* 1991;13: 249-56.
7. Núñez F, Rodríguez MM, Córdoba JJ, Bermúdez ME, Asensio MA. Composition and toxigenic potential of the mould population on dry-cured Iberian ham. *Int. J Food Microbiol.* 1996; 32: 185-97.
8. Rodríguez M, Martín A, Núñez F. Población microbiana del jamón ibérico y su contribución en la maduración. Cultivos iniciadores. En: *Tecnología del jamón ibérico*. J. Ventanas (coordinador). Editorial Mundi-Prensa, Madrid, 2001; 343-66.
9. Laich FS. Caracterización de la microflora superficial de la cecina y la elaboración de un cultivo iniciador de *Penicillium nalgiovense* con cepas no productoras de penicilina. Tesis doctoral. Universidad de León. León-España. 2001.
10. Wilkin DR. The control of mites in cheese stores. *Recent Advances in Acarology*. 1979; 1: 221-9.
11. McClymont PD. Reproductive success of the mite *Acarus sirio* L. on stored Cheddar cheese of different ages. *J Stor Produc Res.* 1983; 19: 97-104.
12. Zďarkova E, Reska M. Weight losses of groundnuts (*Arachis hypogaea* L.) from infestation by the mites *Acarus siro* and *Tyrophagus putrescentiae*. *Journal of Stor Produc Res.* 1976; 12 (2): 101-4.
13. Shave P. The coconut-a means of transportation of high humidity dependent organisms. *Entomologist's Monthly Magazine*. 120 (Sept-Dec.): 1984: 215.
14. Quintero MT, Acevedo HA. Studies on deep litter mites on faros in Mexico. En: *Modern Acarology*. Bukva, F. D. y V (eds). Academia Prague. 1991^a; 443-8.
15. Quintero MT, Acevedo HA. Mites of fermented liquid foods in Mexico. En: *Modern Acarology*. Bukva, F. D. y V (eds). Academia Prague. 1991^b: 611-4.
16. Czajkowska B, Kropczynska D. The influence of different host plants on the reproductive potential of *Tyrophagus putrescentiae* (Scrank) and *Tyrophagus neiswanderi* Johnston and Bruce (Acaridae). En: *The Acari, Reproduction, development and life-story strategies*. Schuster, R (eds). Chapman & Hall. Victoria. 1981: 1.313-7
17. Cantoni C, D'Aubert S, Calcinardi C. L'acaro del prosciutto crudo stagionato. *Atti della Societa Italiana delle Science Veterinarie*. Vol. XXIV. 1970: 501-4.
18. Griffiths DA, Hudson AC, Christensen CM. Grain storage fungi associated with mites. *J. Econ. Ent.* 1959; 52: 514-8.
19. Di Loreto V, Ottoboni F, Cantoni C. Acarofauna del prosciutto crudo stagionato. *Ind. Aliment.* 1985; 12: 1011.
20. Rodriguez del Rio P, Tudela Garcia JI, Narganes NJ, Fernández-Caldas E, Rodríguez-Garcia V, Subiza J. Occupational Asthma Caused by the Inhalation of *Tyrophagus putrescentiae* Allergens in a Dry-Cured Ham Transporter Allergic to Shrimp. *Investig Allergol Clin Immunol.* 2012; 22(5): 372-92
21. Blainey AD, Topping MD, Ollier S, Daves RJ. Allergic respiratory disease in grain workers: The role of storage

mites. *J. Allergy Clin. Immunol.* 1989; 84: 296-303.

22. Matsumoto T, Hisano T, Hamaguchi M, Miike T. Systemic anaphylaxis after eating storage-mite-contaminated food. *Int. Arch. Allergy Immunol.* 1996; 109: 197-200.

23. Larche-Mochel M, Doignon J, Dakkali-Hassani MH. A clinical case concerning a producer of Bayonne Ham: Allergy to acarids. *Arch. MAI Prof. Med. Trav. Secur. Soc.* 1993; 54: 437-8.

24. Armentia A, Fernández A, Pérez-Santos C, De La Fuente R, Sánchez P, Sánchez F, Méndez J, Stolle R. Occupational allergy to mites in salty ham, chorizo and cheese. *Allergol. et Immunopathol.* 1994; 22 (4): 152-4

25. Zdářková E. Stored product acarology. En: *Modern Acarology*. F. Dusbábek and V. Bukva (eds). Academia, Prague and SPB Academic Publishing bv, The Hague, Prague. 1991a; Vol. 1, p. 211-8.

26. Hart BJ. Ecology and biology of allergenic mites. In: *Mites and Allergic Disease*. Fain, A.; Guérin, B. & Hart, B. J. Allerbio (eds). Varennes. 1990: p. 135-52.

27. Salles-Gazêta G, Neres-Norberg A, Aboud-Dutra AE, Maués Serra-Freire N. *Tyrophagus putrescentiae* (SCHRANK, 1781) vetor de bactérias patogênicas: observação laboratorial. *Entomologia y Vectores*, Rio de Janeiro. 2000; (1): 49-59.

28. Arnau J, Guerrero L, Gou P, Monfort JM. Tecnología, Microbiología y principales problemas tecnológicos del jamón curado. En: *Enciclopedia de la carne y lo productos cárnicos*. Martín-Macias (eds). Madrid. 2001: 1177-204.

29. Jorrín J. 2001. Modelos de lucha frente a los ácaros en el jamón curado. *Eurocarne*. 100: 69-74.

30. Estrada PA, Sánchez AC, Castillo-Hernández JA, Gutiérrez-Galindo JF. *Tyroborus lini* (Oudemans, 1924) como ácaro contaminante de alimentos. *Rev Ibér. Parasit.* 1981; 41(3): 435-45.

31. Zumalacárregui JM, Díez FVA. Cecina y Tasajo. En: *Enciclopedia de la Carne*. Martín y Macias (eds). Madrid. 2001: 1162-75.

32. Rivard I. Influence of temperature and humidity on longevity, fecundity and rate of increase of the mite *Tyrophagus putrescentiae* (Schrank) (Acarina: Acaridae) reared on mold cultures. *Can J Zool.* 1961; 39: 869-76.

33. Sinha RN, Mills JT. Feeding and reproduction of the grain mite and the mushroom mite on some species of *Penicillium*. *J. Econ. Entomol.* 1969; 61 (6): 1548-52.

34. Rota P. Gli acari infestanti i formaggi e i salumi in stagionatura. *Atti 1° Simp. La Difesa Antiparassitaria nelle Industrie Alimentarie e la Protezione degli Alimenti*. Piacenza. 1972: 201-18.

35. Guinelli I. *Le conserve di carne*. Parma. 1950.

36. Arnau J, Guerrero L. Physical methods of controlling mites in dry-cured ham. *Fleischwirtschaft.* 1995; 74 (12): 1311-3.

37. Arnau J, Hugas M, Monfort JM. Medidas preventivas para la lucha contra los parásitos del jamón curado. *Cárnica* 2000. 1985; 18: 183-6.

38. Arnau J, Hugas M, Monfort JM. El jamón curado: aspectos técnicos. *Centro de Tecnología de la Carne (IRTA)*(eds). Girona. 1987.

39. Escudero M, López A. Etología aplicada al control de las plagas de ácaros del jamón. *Junta de Andalucía (eds). Consejería de Agricultura y Pesca*. Sevilla. 2001; 49-118.

40. Sánchez-Molinero F, Arnau J. Effects of the applications of oil drip onto surface and of the use of a temperature of 35°C for 4 days on some physicochemical, microbiological and sensory characteristics of dry-cured ham. *Meat Sci.* 2014 May 5;98(2):81-7.

41. Marazza V, Persiani G. Azione delle basse temperature su acari infestanti gli alimenti di origine animale. *Atti Società Italiana delle Scienze Veterinarie*, XIII, 1959 383.

42. Garcia N.. Efforts to control mites on Iberian ham by physical methods. *Exp. Appl. Acarol.* 2004; 32: 41-50.

43. Benz G. Integrated pest management in material protection, storage and food industry. 1987; 31-69. En: *Protection intégrée: quo vadis? "Parasitis 86"*. Delucchi, V (eds). Suiza.

44. Flores J, Lorenzo P, Catalá F. Eliminación de los ácaros del jamón mediante tratamiento con gases. *Centro de Tecnología de la Carne (IRTA)* (eds). Valencia. 1989: 321-33.

45. Guerrero L, Arnau J. Dry cured hams. Chemical methods to control mites. *Fleischwirtschaft.* 1995; 75(4): 449-50.

46. Sánchez-Molinero F, García-Regueiro JA, Arnau J. Processing of dry-cured ham in a reduced-oxygen atmosphere: effects on physicochemical and microbiological parameters and mite growth. *Meat Sci.* 2010; 84(3):400-8.

47. Sonenshine DE. Pheromones of acari and their

- potential use in control strategies. En: *Acarology VI*. Vol. 1. Griffiths, D. A. & Bowman, C. E (eds.). Ellis Horwood Limited. Chichester. 1984: 99-107.
48. Kuwahara Y. Pheromone studies on Astigmatid mites-alarm, aggregation and sex. En: *Modern Acarology*. Dusbábek F and Bukva V (eds). Academia, Prague and SPB Academic Publishing bv. The Hague. 1991: Vol. 1: p. 43-52.
49. Sánchez LJ. Control de ácaros contaminantes del jamón Ibérico. Tesis Doctoral. Universidad de Extremadura. Cáceres. 2002.
50. Perrucci S. Acaricidal activity of some essential oils and their constituents against *Tyrophagus longior*, a mite of stored food. *J. Food Protec.* 1995; 58: 560-3.
51. Sánchez RI, Castañera P. Acaricidal activity of natural monoterpenes on *Tyrophagus putrescentiae* (Schränk), a mite of stored food. *J. Stored Product. Res.* 2001; 37: 93-101.
52. Yamamoto N, Miyazaki Y, Sakuda K. Sensory evaluation of carpet cleaner containing essential oil and the effect on mites. *J. Wood Sci.* 1998; 44: 90-7.
53. Hiramatsu Y, Miyazaki Y. Effect of volatile matter from wood chips on the activity of house dust mites and on the sensory evaluation of humans. *J. Wood Science.* 2001; 47: 13-7.
54. Olalla R. Estudio del efecto acaricida de diferentes aceites esenciales y sus componentes activos sobre cultivos de *Dermatophagoides pteronyssinus* (Trouessart, 1897). Tesis de licenciatura. Universidad Del País Vasco. Bilbao. 1998.
55. Ascher KR. Nonconventional insecticidal effects of pesticides available from the neem tree, *Azadirachta indica*. *Arch. Insect Biochem. Physiol.* 1993; 22: 433-49.
56. Rembold H. Insects. Biological effects of neem and their modes of action. Growth and metamorphoses. En: *The Neem Tree*. Schmutterer, H VHC (eds). Weinheim. 1995:177-92.
57. Kraus W. Biologically active ingredients. Azadirachtin and other triterpenoids. En: *The Neem Tree*. Schmutterer, H VHC (eds). Weinheim. 1995: 35-73.
58. Hiiesaar K, Metspalu L, Kuusik A. An estimation of influences evoked by some natural insecticides on greenhouse pest-insects and mites. En: *Practice oriented results on the use plant extracts and pheromones in pest control*. Proceedings of the International Workshop. Estonia. 2001: 24-25 January 2001.
59. Ishaaya I, De Cock A, Degheele D. Piriproxifén, a potent suppressor of egg hatch and adult formation of the greenhouse whitefly (Homoptera: Aleyrodidae). *J Econ Entomol.* 1994; 87: 1185-9.
60. RohMid. Technical information bulletin. RH-0345, turf and ornamental insecticida. RohMid LLC, Philadelphia, PA. 1996.
61. Komblas KN, Hunter RC. BCPC Conf. Pests Dis. 1986; 3: 907-14.
62. Chamman y Hall. Dictionary of nature products. Chapman an Hall dictionaries on CD-ROM. 1999.
63. Berdy J. Bioactive natural product database (BNPD). Szensor Management consulting Com, Budapest. 2000.
64. Salgado VL. The modes of action of spinosad and other insect control products. *Down to Earth*, 1997; 52 (1): 35-43.
65. Bret BL, Larson LL, Schoonover JR, Sparks TC, Thompson GD. Biological properties of spinosad. *Down to Earth*. 1997; 52 (1): 6-13.
66. Turner WB, Aldridg DC. Fungal metabolites II. Academic Press, London. 1983.
67. Teetor-Barsch GH, Roberts DW. Entomogenous *Fusarium* species. *Mycopathologia.* 1983; 84: 3-16.
68. Hajek AE, St Legar RJ. Interactions between fungal pathogens and insect host. *Annu Rev Entomol.* 1994; 39: 293-322.
69. Cleland TA. Inhibitory glutamate receptor channels. *Mol Neurobiol* 1996; 13:97-136.
70. Eldefrawi ME, Abalis M, Filbin MT, Eldefrawi AT. Glutamate and GABA receptors of insect muscles: biochemical identification and interaction with insecticides. In: *Approaches to new leads for insecticides*. von keyesenlingk HC, Jäger A, von Szczepanski C (eds). Springer, Berlin. 1985: 101-16.
71. Kubo I, Kim M, Wood WF, Naoki H. Clitocine, a new insecticidal nucleoside from the mushroom *Clitocybe inversa*. *Tetrahedron Lett.* 1986; 27: 4277-80.
72. Sterner O, Bergman R, Kihlberg J, Oluwadiya J, Wickberg B, Vidari G, De Bernardi M, De Marchi F, Fronza G, Vita-Finzi P. Basidiomycete sesquiterpenes: the silica gel induce degradation of velutinal derivatives. *J Org Chem.* 1985; 50: 950-53.
73. Siegel MR, Bush LP. Toxin production in grass/endophyte associations. In: *The Mycota, Vol. V, part A. Plant relationships*. Esser K, Lemke PA (eds). Spriger, Berlin Heidelberg. New York. 1997: 185-207.

74. Belofsky GN, Gloer JB, Wicklow DT, Dow PF. Sheraamide A: a new cyclic peptide from the ascostromata of *Eupenicillium shearii*. *Tetrahedron Lett.* 1998; 39: 5497-500.
75. Morino T, Nishimoto M, Masuda A, Fujita S, Nishikiori T, Satto S. NK374200, a novel insecticidal agent from *Talaromyces*, found by physicochemical screening. *J Antibiot.* 1995; 48: 1509-510.
76. Oh H, Swenson DC, Gloer JB, Wicklow DT, Dow PF. Chaetochalasin A: a new bioactive metabolite from *Chaetomium brasiliense*. *Tetrahedron Lett.* 1998; 39: 7633-6.
77. Gloer JB. Antiinsectan natural products from fungal sclerotia. *Accts Chem Res.* 1995; 28: 343-50.
78. Hayashi H, Asabu Y, Murao S, Nakayama M, Ari M. New okarimine congeners, okarimines D,E, and F, from *Penicillium simplicissimum* AK-40. *Biosci Biotech Biochem.* 1995; 59: 246-50.
79. Gloer JB, Wicklow DT, Dowd PF, Alfatafta AA. Ochrotoxin A: an antiinsectan metabolite from the sclerotia of *Aspergillus carbonarius* NRRL 369. *Can J Microbiol.* 1996; 42: 1100-3.
80. Castillo M, Moya P, Couillaud F, Garcerá MD, Martínez-Pardo R. A heterocyclic oxime from a fungus with anti-juvenile hormone activity. *Arch Insect Biochem Physiol.* 1998; 37:287-94.
81. Davies R. G. *Introducción a la Entomología*. Mundi-Prensa (eds). Madrid. 1991: 449.
82. Arbogast RT. Biological control of stored-product insects; status and prospects. En: *Insect Management for Food Storage and Processing*. Baur, F. J. AACC (eds). St Paul, Minnesota. 1984: 226-38.
83. McMurtry JA. A consideration of the role of predators in the control of acarine pest. In: *Acarology VI*, Vol. 1. Griffiths, D. A. y Bowman, C. E (eds). Ellis Horwood Limited. Chichester. 1984: 108-21.
84. Ottoboni F, Falagini P, Centanni S. Gli acari allergenici. *Boll. Ist. Sieroter. Milano.* 1984; 63: 389-419.
85. Zdářková E. Application of the bio-preparation "Cheyletin" in empty stores. En: *Modern Acarology*. Dusbábek F and Bukva V (eds). Academia, Prague and SPB Academic Publishing bv, The Hague, Vol. 1. Prague. 1991b: 607-10.
86. Berren JM, Metwally AM. Reproductive rates in *Cheyletus eruditus* (Schrank). En: *Acarology VI*, Vol. 1. Griffiths, D. A. & Bowman, C. E (eds). Ellis Horwood Limited. Chichester, Inglaterra. 1984: 512-8.
87. Zdářková E. The effectiveness of organophosphate acaricides in stored product mites interacting in biological control. *Exp Appl Acarol.* 1994; 18: 747-51.
88. Kanga HL, James R, Boucias D. *Hirsutella thompsonii* and *Metharhizium anisopliae* as potential microbial control agents of *Varroa destructor*, a honey bee parasite. *J Invertebr Pathol.* 2002; 81: 175-84.
89. Smith K, Wall R, French N. The use of entomopathogenic fungi for the control of parasitic mites, *Psoroptes* spp. *Veterinary Parasitology* 2000; 92: 97-105.
90. Brooks A, Wall R. Infection of *Psoroptes* mites with the fungus *Metarhizium anisopliae*. *Exp. Appl. Acarol.* 2001; 25: 869-80.
91. Zhang L, Shi WB, Feng MG J. Histopathological and molecular insights into the ovicidal activities of two entomopathogenic fungi against two-spotted spider mite. *Invertebr Pathol.* 2014 Mar; 117: 73-8.
92. Pereira MR, Alves S, Rossi L, Lopes R, Tamari MA. *Beauveria bassiana* yeast phase on agar medium and its pathogenicity against *Diatraea saccharalis* (Lepidoptera: Crambidae) and *Tetranychus urticae* (Acari: Tetranychidae). 2002. *J Invertebr Pathol.* 2002 Oct; 81(2):70-7.
93. Harper AM, Huang HC. Evaluation of the entomophagous fungus *Verticillium lecanii* (Moniliales: Moniliaceae) as a control agent for insects. *Environ. Entomol.* 1986; 15: 281-4.
94. Gillespie AT. Use of *Verticillium lecanii* to control thrips (*Thrips tabaci*) and red spider mite (*Tetranychus urticae*) on cucumber. 95. In *Proc, 20th. Ann. Mt. Soc. Invert. Pathol.* 1987.
95. Ahmed AA, Abd-Elhady HK. Efficacy of two fungus-based biopesticide against the honeybee ectoparasitic mite, *Varroa destructor*. *Pak.J Biol Sci.* 2013 Aug 15;16(16):819-25.
96. Maniania NK, Bugeme DM, Wekesa VW, Delalibera I Jr, Knapp M. Role of entomopathogenic fungi in the control of *Tetranychus evansi* and *Tetranychus urticae* (Acari: Tetranychidae), pests of horticultural crops. *Exp Appl Acarol.* 2008 Dec;46(1-4):259-74.
97. De Jong DD, Morse RA, Eickwort GC. Mite pests of honey bees. *Annu. Rev. Entomol.* 1982; 27: 229-252.
98. Bates PG. Inter and intraspecific variation within the genus *Psoroptes* (Acari: Psoroptidae). *Vet. Parasitol.* 1999; 83: 201-18.
99. Solomon ME, Cunnington AM. Rearing acaroid

mites. *Acarologia*, 1964; 6, 339.

100. Rodríguez JG, Potts MF, Patterson CG. Mycotoxin-producing fungi: effects on stored product mites. En: *Acarology VI*, Vol. 1. Griffiths, D. A. & Bowman, C. E. (eds) Ellis Horwood Limited. Chichester. 1984: 343-50.

101. Erban T, Nesvorna M, Erbanova M, Hubert J. *Bacillus thuringiensis* var. *tenebrionis* control of synanthropic mites (Acari: Acaridida) under laboratory conditions. *Exp Appl Acarol*. 2009 Dec;49(4):339-46.

102. Salen SM, Kelada NL, Shader N. Control of European house dust mite *Dermatophagoides pteronyssinus* (Trouessart) with *Bacillus* spp. *Acarologia*. 1991; 32: 257-60.

103. Guo YL, Zuo GS, Zhao JH, Wang NY, Jiang JW. A laboratory test on the toxicity of thuringiensin to *Tetranychus urticae* (Acari: Tetranychidae) and *Phytoseiulus persimilis* (Acari: Phytoseiidae). *Chinese J. Biol. Contr.* 1993; 9: 151-5.

104. Yang LY, Wang JD, Zhang J, Xue CY, Zhang H, Wang XJ, Xiang WS. New nemadectin congeners with acaricidal and nematocidal activity from *Streptomyces microflavus* neu3 Y-3. *Bioorg Med Chem Lett*. 2013 Oct 15; 23 (20): 5710-3.

105. Wang XJ, Zhang J, Wang JD, Huang SX, Chen YH, Liu CX, Xiang WS. Four new doramectin congeners with acaricidal and insecticidal activity from *Streptomyces avermitilis* NEAU1069. *Chem Biodivers*. 2011 Nov; 8 (11): 2117-25.

106. Berezina NV, Tsizhov VN, Drinjajev VA, Jurkiv VA. Perspectives of using Avermectins consisting preparations in pest control. *Gavrish*. 1997; 2: 10-3.

107. Hugas M, Arnau J. Encureesta sobre el proceso de fabricación del jamón curado. En: *El jamón curado: aspectos técnicos* IRTA. Arnau J, Hugas M, Montfort JM (eds). Girona. 1987.

108. Rodríguez M. Evaluación tecnológica y sanitaria de las micrococáceas en la maduración del jamón de cerdo ibérico. Tesis Doctoral. Universidad de Extremadura. 1995.

109. Jorrín, J, Magallanes M, Vargas P. Etiología de la peste por ácaros en el jamón curado. *Eurocarne*. 2001; 99: 39-44.

Innovaciencia 2014; 2 (1): 50 - 57

BIOMASA RESIDUAL VEGETAL: TECNOLOGÍAS DE TRANSFORMACIÓN Y ESTADO ACTUAL

VEGETABLE RESIDUAL BIOMASS: TECHNOLOGIES OF TRANSFORMATION AND CURRENT STATUS

*Pedro Elías Patiño Martínez*¹

Cómo citar este artículo: Patiño Martínez PE Biomasa Residual Vegetal: Tecnologías de transformación y estado actual. Innovaciencia facultad cienc. exactas fis. naturales. 2014; 2(1): 50 - 57

Artículo recibido el 02 de junio de 2014 y aceptado para publicación el 15 de septiembre de 2014

Resumen

La biomasa residual vegetal es una alternativa para la producción de energía a nivel mundial. La conversión de los residuos vegetales en alguna forma energética requiere la aplicación de tecnologías que estén acorde a lo expresado en el numeral IV, artículo 2 del Protocolo de Kyoto de la convención marco de las Naciones Unidas sobre cambio climático (1998) y normativas específicas de cada país o región. Las tecnologías que se le pueden aplicar a los residuos vegetales son bien conocidas a nivel mundial, dentro de estas se incluye: la combustión que permite generar un combustible denominado bio-oil, la gasificación que genera principalmente dióxido de carbono y amoníaco, la pirólisis que genera un gas combustible, y procesos biológicos (fermentación y digestión) que generan bioetanol y biogás. Actualmente en España, Estados Unidos, Brasil y Alemania, entre otros, se vienen desarrollando políticas con el fin de incentivar la implementación de plantas de biomasa. En Colombia la transformación de la biomasa residual vegetal hasta ahora se encuentra en fase de experimentación en laboratorios de Investigación científica principalmente en instituciones de educación superior.

Palabras clave: Biomasa, Protocolo de Kioto, Biodiesel, Combustión, Carbono, Energía.

Abstract

The vegetable residual biomass is an alternative for energy production worldwide. To carry out the process of transforming waste into energy carrier, the application of technologies that are consistent with the statement in Section IV, Article 2 Kyoto Protocol to the Framework Convention of the United Nations on Climate Change (1998) and specific regulations of each country or region are required. The technologies that can be applied to vegetable residues are well known globally, within these include: the combustion that generates a fuel called bio-oil, gasification mainly generated carbon dioxide and ammonia, pyrolysis generates a combustible gas, and biological processes (fermentation and digestion) which generate ethanol and biogas. Currently in Spain, USA, Brazil and Germany, amongst other countries, policies have been developed in order to encourage the implementation of biomass plants. In Colombia the residual biomass conversion vegetable so far is being tested in scientific research laboratories mainly in institutions of higher

1. Licenciado en Biología, Especialista en Administración y Docencia Universitaria, Magister en Sistemas Energéticos Avanzados. Profesor Asociado. Universidad de Santander, Facultad de Ciencias Exactas Físicas y Naturales, Grupo de Investigación CIBAS. Bucaramanga. Correspondencia: ppatino@udes.edu.co

education as the IUniversidad Industrial de Santander, Universidad de Antioquia and Universidad Nacional de Colombia, among others.

Keywords: Biomass, Kyoto Protocol, Biodiesel, Combustion, Carbon Energy.

INTRODUCCIÓN

La biomasa se refiere a “todo material de origen biológico, excluyendo aquellos que han sido englobados en formaciones geológicas sufriendo un proceso de mineralización (PER 2011-202)”. También la biomasa es referida principalmente a la energía solar convertida por la vegetación en más vegetación o materia orgánica y posteriormente dicha materia orgánica puede ser convertida en diferentes tipos de energía, acorde al uso que se le quiera dar.

En el contexto energético, el término biomasa se emplea para denominar a una fuente de energía renovable basada en la utilización de la materia orgánica formada por vía biológica o de los productos derivados de ésta¹.

La biomasa es una energía renovable, ya que su contenido energético es el resultado de la fotosíntesis, nombre dado al proceso de conversión de la energía lumínica del sol en energía química (ATP) utilizada posteriormente para la transformación del dióxido de carbono (CO_2) y el agua (H_2O) en carbohidratos y oxígeno (O_2). La fotosíntesis se divide en dos fases:

1. Lumínica (Fotoquímica o reacción de Hill): en esta fase la luz solar es absorbida por las moléculas de clorofila que están almacenadas en los tilacoides del cloroplasto, los electrones de la clorofila son lanzados a niveles energéticos superiores oxidando la clorofila. La energía contenida en los electrones se usa para transformar el ADP en ATP, en esta misma etapa las moléculas de H_2O se rompen liberando oxígeno (O_2)².

2. Fase Oscura o independiente de Luz: en esta fase el ATP formado en la fase anterior se utiliza para convertir el CO_2 en carbohidratos sencillos ($\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$), esta fase también es conocida como fase de fijación del Carbono. Los carbohidratos son la forma química de almacenamiento de energía y que luego va a ser transformada en otra fuente energética mediante los procesos de transformación anaeróbicos³.

Tipos de biomasa vegetal:

Forestal o de bosques: Este tipo de biomasa ha sido la más explotada en el mundo con fines energéticos y posiblemente lo siga siendo durante varias décadas. La explotación forestal para obtener leña principalmente

se ha tecnificado y para aprovechar suficientemente cualquier otro residuo resultante, consecuentemente los resultados catastróficos ambientales son muy altos; lo anterior en razón a que la biomasa de los bosques realiza una tasa alta de fijación de N_2 y CO_2 ; y ante la deficiencia que se pueda presentar en estos se incrementa el CO_2 atmosférico y así mismo al fortalecimiento del efecto invernadero que a su vez provoca el calentamiento global. En la región de la Amazonía colombiana hay un potencial de biomasa superior a 11.000 Mton representadas en un área aproximada de 435.000 Km^2 . La región Amazonas abarca gran parte del territorio de Colombia, alrededor de un 40%, la mayor parte es llano, selvático, con una parte conocida como piedemonte amazónico, formado por las estribaciones de la Cordillera Oriental Colombiana⁴.

Biomasa residual y/o industrial: Es la que se genera como consecuencia de cualquier proceso en que se consume biomasa y se produce en explotaciones agrícolas, forestales o ganaderas, así como los residuos de origen orgánico generados en las industrias y en los núcleos urbanos⁵. La utilización de biomasa residual es, en principio, atractiva, pero limitada: en general, es más importante la descontaminación que se produce al eliminar estos residuos que la energía que se puede generar con su aprovechamiento. Sin embargo, pueden hacer autosuficientes desde el punto de vista energético a las instalaciones que aprovechan sus propios residuos tales como granjas, industrias papeleras, serrerías o depuradoras urbanas¹.

Biomasa Residual agrícola y de residuos de poda: La biomasa residual agrícola herbácea es la paja de cereal (arroz, trigo, cebada, centeno, etc.), la caña del maíz y el girasol. La biomasa residual generada de poda es la obtenida de los cultivos leñosos⁶. Según la composición de Carbohidratos (compuestos más abundantes en la biomasa vegetal) se puede clasificar en:

- Biomasa Lignocelulosa: en esta predominan las celulosas de hemicelulosa, holocelulosa y lignina^{7, 8}.
- Biomasa amilácea: en esta predomina hidratos de carbono como el almidón y la inulina, estos son polisacáridos de reserva en los vegetales⁹.
- Biomasa azucarada: los hidratos de carbonos son azúcares monosacáridos (glucosa o fructosa) o disacáridos como la sacarosa¹⁰.
- Biomasa energética: incluye los materiales de origen biológico que no pueden ser empleados con fines alimenticios, está cubre actualmente el 14% de las necesidades energéticas mundiales y en los países industrializados, solo cubre el 3% de la energía

primaria; con la excepción de los países nórdicos europeos, donde su utilización para producción de calor en centrales avanzadas es bastante común¹¹.

Estado actual de la Biomasa en el mundo

Los países en vía de desarrollo emplean la biomasa, en el consumo tradicional de leña en un 38% de su demanda energética y en algunos países de África, este porcentaje se eleva al 90%. Respecto a su uso en el mundo, el 75% es doméstico tradicional y el 25% es industrial. La producción de energía primaria procedente de biomasa en los 25 países de la Unión Europea en 2006 fue de 62,4 millones de toneladas equivalentes de petróleo (Mtep). La cantidad correspondiente en los años anteriores había sido de 59,3 en 2005, 55,6 en 2004 y 52,5 en 2003. Por tanto, el incremento anual de la producción fue del 5,9% en el año 2004, 6,7% en 2005 y 5,3% en 2006¹². Finlandia es el país del mundo que más emplea la energía procedente de biomasa sólida, la cual supone el 30% de su consumo total de energía primaria y aproximadamente el 20% de su producción de electricidad. En Finlandia se favorece la producción de calor y electricidad procedente de la biomasa con la exención total del impuesto sobre la energía pagado por los consumidores finales. Además hay subvenciones, que pueden llegar hasta el 30%, a las inversiones en plantas de generación eléctrica con biomasa. Para financiar la producción de electricidad procedente de fuentes renovables se utiliza la recaudación que se obtiene con un impuesto sobre el CO2 aplicable a combustibles fósiles¹²

De los países de la comunidad Europea, según datos del Observatorio Nacional de Calderas de Biomasa (ONCB), a diciembre de 2012 se estimó que España disponía de 4.000 MW instalados. El grueso de instalaciones recogidas en el ONCB es de uso doméstico, con el 86,6% de las referencias, y el 20% en potencia¹³.

Entre los países asiáticos, China es un gran país agrícola y uno de los más abundantes recursos de paja en el mundo, produciendo más de 620 millones de toneladas en 2002, la cual representa alrededor del 33-45% del consumo de energía de subsistencia en las zonas rural¹⁴.

Durante el encuentro Iberoamericano sobre desarrollo sostenible (EIMA, 2012), Altino Ventura, Secretario de Planificación Energética del Ministerio de Minas y Energía de Brasil (MME), comparó la oferta energética de Brasil con el resto del mundo. “En Brasil, el 45% de la energía proviene de fuentes renovables, mientras que en el mundo es de sólo el 13%. Con relación a la energía de fuentes fósiles, el mundo se abastece

de un 81%, entre petróleo, carbón y gas natural, y en Brasil es del 53%; la producción de energía a partir de la biomasa se ha incrementado, especialmente a partir de los derivados de la caña de azúcar (etanol, bagazo y paja de caña”.

Tabla 1: Potencial energético de la biomasa residual vegetal en Colombia

Residuo	Ton/año*	Potencial Energético (TJ/año)
Plátano	11.500.000	6.600
Café	5.050.000	49.100
Caña de Azúcar	15.534.600	118.578
Palma	1.660.000	16.073
Maíz	1.940.000	20.800
Arroz	6.282.400	27.736
Banano	11.551.000	6.600

**Información suministrada por los centros de investigación y federaciones relacionadas con el gremio (Cenipalma, Cenicaña, Cimpa, Cenicafé, Augura, Fedearroz y Fenalce)*

Estado actual de la Biomasa en el Colombia

Colombia se caracteriza por tener un gran potencial de biomasa a partir de residuos vegetales (tabla 1) y se tiene un estimado de residuo de poda mayores a 44815 ton/año correspondientes al 27% de los Residuos Sólidos Orgánicos Urbanos (RSOU), el potencial energético de los residuos de poda es mayor (78%) que el resto de RSOU¹⁵.

En el Departamento de Santander se han realizado estudios experimentales para determinar el aprovechamiento de los residuos vegetales entre los que están: el beneficio del fique en Colombia genera 15.000 toneladas de residuo (bagazo)/ha sembrada. El análisis fisicoquímico determino que el poder calorífico es de 3298 Kcal/Kg, lo cual la hace idóneo para la producción de biogás¹⁶. Determinación del potencial energético de los residuos vegetales del arroz¹⁷. La Cascarilla y el Tamo, los cuales tienen un potencial para ser aprovechados energéticamente por procesos termoquímicos y biológicos. Se estimó que el potencial energético de los residuos del sector arrocero es de 67.723 TJ/año, proveniente de 5.907.648 Ton/año de residuos. Se mostró la importancia del sector arrocero en Colombia como fuente constante de recursos agrícolas.

En la Fundación Universitaria Tecnológico Comfenalco se ha venido estudiando el aprovechamiento de los residuos de poda y la búsqueda de materias primas para producir biocombustibles. Se llevó a cabo la hidrólisis

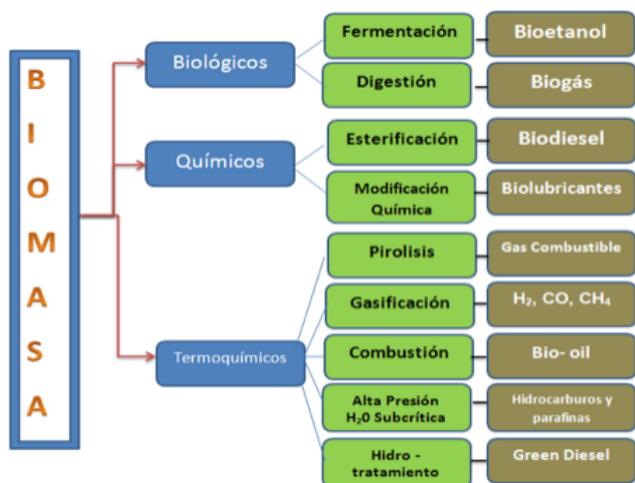
de la biomasa lignocelulosa contenida en los residuos de poda, con el fin de producir jarabes glucosados para, potencialmente, ser convertidos en bioetanol. Se aplicaron dos metodologías: la hidrólisis ácida, usando ácido sulfúrico diluido y la hidrólisis enzimática, con enzimas celulasas. Se obtuvo una mayor conversión con la hidrólisis ácida de todas las muestras (entre 10 y 30 g/L de glucosa) que con la hidrólisis enzimática de los residuos mezclados (8,83 g/L de glucosa), quedando abierta la posibilidad de obtener biocombustibles a partir de este tipo de residuos¹⁸.

El total del potencial energético de Biomasa Residual en Colombia es de 409,3 Terajulios/Año (TJ/año). Según el tipo de residuo, el 91,74 TJ/año corresponde al generado en plazas de mercado y 318,13 TJ/año a residuos de poda¹⁷.

Procesos y tecnologías de transformación de Biomasa

La biomasa debe someterse a varios procesos para ser utilizada como fuente de energía. La finalidad de estos procesos es la transformación de la energía acumulada en forma de carbono e hidrógeno, en combustibles sólidos, líquidos, gaseosos o directamente en electricidad. Estos tipos de energía tienen mayor espectro y son más fáciles de utilizar¹⁹. Los procesos y tecnologías de transformación a la que se pueden someter los residuos vegetales se pueden observar en la figura 1. Existen tres procesos de transformación: a) Procesos termoquímicos, como la combustión (producción de bio-oil), pirolisis (gas combustible), gasificación (H_2 , CO , CH_4), Alta presión-Agua subcrítica y el hidrotatamiento; b) Procesos de conversión biológica incluyen la fermentación (bioetanol), y la digestión (biogás):

Figura 1. Tecnologías de transformación de la biomasa (UPME 2003)



Fuente: Autor del artículo

una mezcla principalmente de metano y dióxido de carbono) y c) Procesos químicos incluyen la Esterificación (Biodiesel), y las modificaciones estructurales químicas (reacción de esterificación)²⁰. A continuación, se hará una descripción de los métodos mencionados.

Combustión directa: desde hace mucho tiempo la biomasa se ha empleado en pequeñas calderas domésticas para generar calor. En general, se trata de sistemas de poca eficiencia energética donde la biomasa no requiere de ningún tratamiento previo²¹ y para su aprovechamiento industrial, es necesario recurrir a grandes instalaciones, basadas en la generación de vapor a alta temperatura y presión/electricidad. Acorde a la tecnología empleada, se distinguen tres (3) tipos de menor a mayor eficiencia²²:

- *Calderas de lecho fijo o parrilla.* El combustible, en astillas o trozos de varios centímetros, se introduce sobre unas placas vibrantes o parrillas inclinadas, en las que se quema al tiempo que se desplaza hacia un colector de cenizas en el extremo opuesto a la inyección.

- *Calderas de lecho fluido.* El combustible se reduce a tamaños menores (mm) y se mantiene en suspensión junto con partículas de arena («lecho»). En ocasiones se añade al lecho un ciclón y el flujo es circulante, siendo arrastradas por el aire usado en la combustión sólo las partículas de ceniza.

- *Calderas de combustible pulverizado o lecho arrastrado.* El combustible se muele hasta tamaños típicamente menores de un milímetro, y se introduce en la caldera a través de quemadores junto con el aire de combustión. Las partículas se van quemando a lo largo de la caldera, y salen junto con los gases hacia las etapas de filtrado y limpieza.

Co-combustión: la biomasa se lleva a una caldera alimentada con carbón. La principal ventaja es el aprovechamiento de la estabilidad y eficiencia del conjunto de la caldera y la reducción de incertidumbres tanto en el comportamiento como en el suministro de la biomasa²³.

Pirolisis: es la descomposición de la materia prima de biomasa por el calor, también se conoce como desvolatilización, es endotérmico y produce de 75 a 90% de materiales volátiles en la forma de hidrocarburos líquidos y gaseosos, y carbón²⁴.

Los hidrocarburos volátiles y carbón son posteriormente convertidos en gas de síntesis en el segundo paso. Algunas de las reacciones más importantes que intervienen en esta etapa son las siguientes²⁵.

Reacciones Exotérmicas:

- Combustión {biomasa volátil /carbón} + O₂ → CO₂
- Oxidación Parcial {biomasa volátil /carbón} + O₂ → CO
- Metanización {biomasa volátil /carbón} + H₂ → CH₄
- Agua-Gas Shift CO + H₂O → CO₂ + H₂
- Metanización CO + 3H₂ → CH₄ + H₂O

Reacciones Endotérmicas:

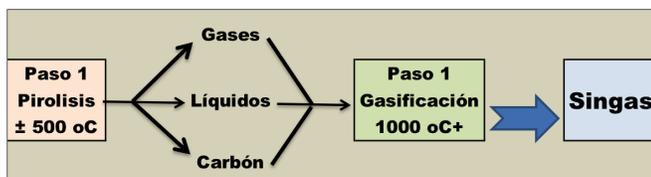
- Reacción de carbón de vapor {biomasa volátil /carbón} + H₂O → CO + H₂
- Reacción de Boudouard {biomasa volátil /carbón} + CO₂ → 2CO

Gasificación: es un término genérico cuya denominación recoge todos los procesos en los que se produce una combustión incompleta con defecto de oxígeno y en los que se producen los siguientes gases: monóxido de carbono, dióxido de carbono, hidrógeno, metano e hidrocarburos de cadena pequeña, en proporciones diversas, según la composición de la materia prima y las condiciones del proceso²⁶. La gasificación es un proceso termoquímico en el que se transforma un combustible sólido en uno gaseoso. El proceso está conformando por varios fenómenos complejos que van desde los mecanismos de transferencia de masa y energía en un sistema reactivo heterogéneo, derivando las etapas de secado y devolatilización del combustible, para dar paso a la oxidación de los volátiles y el carbón, con el consecuente cambio del diámetro de las partículas y las pérdidas de presión en el lecho²⁷. En el proceso de gasificación es necesario tener en cuenta el equilibrio termodinámico y químico, y todas las variables relacionadas con:

- a. Tipo de biomasa.
- b. Porcentaje de humedad
- c. Poder calorífico.

Las reacciones en la gasificación se llevan a cabo a temperaturas elevadas, 500-1400°C, y presión atmosférica elevada de hasta 33bar (480psi). El oxidante utilizado puede ser aire, oxígeno puro, vapor o una mezcla de estos gases. Las reacciones de la gasificación de la biomasa se realizan a través de un proceso de dos pasos pirolisis y gasificación (figura 2).

Figura 2. Etapas de la gasificación



Fuente: Autor del artículo

Debido a su mayor eficiencia y versatilidad, la gasificación es vista como una evolución necesaria en el desarrollo de sistemas de energía de biomasa. Esta tecnología ha sido probada principalmente en lecho fijo (Corriente ascendente y corriente descendente) y sistemas de reacción de lecho fluidizado, con menos información disponible acerca del potencial de los reactores de flujo arrastrado. Este último se beneficia de un diseño relativamente simple estructura mecánica y robustez frente a condiciones severas de gasificación, la inversión y los costos de operación son reducidos²⁸.

La gasificación de biomasa es una forma de conversión de energía que todavía se mantiene en etapa de investigación y se ha desarrollado con algunas aplicaciones en la generación de electricidad. La investigación sobre el tema ha estado centrada en la mejoría del diseño, modelación y evaluación de diferentes tipos de gasificadores. Las aplicaciones prácticas se han llevado a cabo fundamentalmente a través de instalaciones de pequeña y mediana potencia para la generación de energía eléctrica usando motores de combustión interna²⁹.

Digestión Anaerobia (DA): Este proceso se realiza por la acción de bacterias anaeróbicas (bacterias cuyo metabolismo se realiza en ausencia de oxígeno), estas bacterias se desarrollan muy bien a temperaturas hasta de 30°C, es un proceso en serie donde se degrada la materia orgánica en tres etapas fundamentales³⁰:

1. Hidrólisis-Acidogénesis.
2. Homoacetogénesis-acetogénesis.
3. Metanogénesis.

En esta etapas actúan diferentes poblaciones bacterianas: En la acidogénica están las formadoras de ácidos que emplean como materia prima hidratos de carbono, en la acetogénica están las bacterias formadoras de ácido acético las cuales pueden ser inhibidas por H₂, en la etapa metanogénica están las acetófilas y las hidrogenófilas que emplean ácido acético y monóxido de carbono e hidrogeno respectivamente³¹ y el producto de la DA es el biogás, que es una mezcla formada por metano (CH₄), Bióxido de carbono (CO₂), y pequeñas cantidades de hidrógeno (H), sulfuro de hidrógeno (SH₂) y nitrógeno (N)³².

Fermentación: Una de las opciones para producir bioetanol es por fermentación a partir de materias primas ricas en carbohidratos (azúcar, almidón, celulosa, etcétera) de las frutas y vegetales como la caña de azúcar y la remolacha, los cereales (trigo, maíz, sorgo), los tubérculos (papas, yuca) y en general, materias provenientes de ligno-celulosas o de residuos orgánicos³³. Según la Agencia Internacional de Energía³⁴, el potencial de esta fuente de energía es considerable,

pues se calcula que el bioetanol podría sustituir un 25% de la gasolina utilizada como combustible en el año 2025. El biogás contiene entre 55 y 70% de CH₄ (tabla 2)³², el cual puede ser utilizado como una importante fuente energética en la combustión de motores, en turbinas o calderas utilizados en diferentes usos industriales.

Tabla 2: Características del biogás

Características	CH ₄	CO ₂	H ₂ -H ₂ S	Biogás 60/40
Proporciones % Volumen	55-70	27-44	1	100
Valor Calórico MJ/m ³	35.8		10.8	21.5
Valor Calórico KCal/m ³	8600		2581	5140
Ignición % en aire	5-15			6-12

Selección de la tecnología de transformación

La selección de la tecnología más apropiada para realizar la transformación de los residuos de poda se puede hacer utilizando la herramienta denominada Análisis de Decisiones Multicriterio mediante el método denominado Proceso Analítico Jerárquico, AHP (Analytical Hierarchy Process)³⁵. Dicha metodología, permite construir un modelo jerárquico que representa el problema objeto de estudio, mediante criterios y alternativas planteadas inicialmente, para luego poder deducir, cual o cuales son las mejores alternativas y tomar una decisión final óptima. Con este proceso analítico jerárquico se pretende dividir una decisión compleja en un conjunto de decisiones simples, facilitando la comprensión y solución del problema propuesto³⁵.

CONCLUSIONES

Las tecnologías de transformación de la biomasa vegetal son variadas y requieren de infraestructuras robustas que permitan la eficiencia económica y ambiental del proceso. Colombia es un país con poco desarrollo en energías renovables (a excepción de la termohidráulica) y las políticas estatales no son claras así como son mínimos los incentivos para invertir en ellas, razón por la cual la empresa privada no le apuesta a inversiones tan altas en la implementación de tecnologías que permitan la producción de energía limpia.

El poco desarrollo de nuevas tecnologías es también un gran obstáculo para implementar procesos de transformación de residuos. Colombia es un país que se

caracteriza por una gran riqueza en residuos vegetales, que gracias a las investigaciones realizadas por los centros de Investigación se ha logrado caracterizar y en muchos casos aplicar diversas tecnologías de transformación a pequeña escala.

Se estima que en Colombia gracias a la riqueza de los recursos hídricos, a la suficiencia de fuentes fósiles de energía (Petróleo, carbón, etc.) y a la poca importancia que le dan los gobernantes a las energías renovables, no se evidenciara la implementación de las tecnologías de transformación de la riqueza que hay en estos recursos biomásicos y otras formas de energía renovable.

BIBLIOGRAFÍA

1. Fernández, J. Energía De La Biomasa. En Energías renovables para el desarrollo. Thomson-Paraninfo, 2003.
2. Mota, C., Alcaraz-López, C., Iglesias, M., Martínez-Ballesta, M., Carvajal, M. Investigación sobre la absorción de CO₂ por los cultivos más representativos de la región de Murcia. España. CEBAS-Consejo Superior de Investigaciones Científicas. Región de Murcia, España (2009).
3. Arellano, J., De las Rivas, J. Plantas y cambio climático. Investigación y Ciencia. 2006; 42- 50. Disponible en <http://www.investigacionyciencia.es/files/4836.pdf>
4. López-Gonzalez, G., Phillips, O. L. Estudiando el Amazonas: la experiencia de la Red Amazónica de inventarios forestales. Ecosistemas, 2012; 21(1-2):118-25.
5. Ministerio de Ciencia e Innovación. CIEMAT. Obtenido de Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas. 2008.
6. Fundación CIRCE. Evaluación del potencial de biomasa residual en los ecosistemas forestales y los medios agrícolas en la provincia de Huesca. Centro de Investigaciones de Recursos y consumos Energéticos. 2006.
7. Arroyo Ulloa, M., Mendoza Guerrero, P., Jiménez Zuloeta, W., Ruiz Coronado, W. Análisis de viabilidad de un sistema híbrido para la producción de vectores energéticos sostenibles. (Guzlop, Ed.) ECIPERU. Lima 2005; (2):2.
8. Lin, Yu-Chuan, and George W. Huber. "The critical role of heterogeneous catalysis in lignocellulosic biomass conversion." Energy & Environmental Science 2.1. 2009; 68-80.

9. Bastías, E., Díaz, M., Pacheco, C., Bustos, R., Hurtado, E.I. "Caracterización del maíz" Llutefño"(Zea mays L. tipo amylacea) proveniente del norte de Chile, tolerante a NaCl y exceso de boro, como una alternativa para la producción de bioenergía." *Idesia (Arica)* 29.3. 2011; 7-16.
10. Pejó, Tomás, María Elía. Bioetanol de paja de trigo: estrategias de integración de las etapas de proceso. Tesis Doctoral. Universidad Complutense de Madrid, Servicio de Publicaciones, 2009.
11. Demirbas, A. (Combustion characteristics of different biomass fuels, *Progress in Energy and Combustion Science*. Science. 2004; 30(2): 219-30.
12. Tena, Emilio Cerdá. Energía obtenida a partir de biomasa. *Cuadernos económicos de ICE* 83.2012; 83:117-40.
13. Ramos Llorente, J J. La biomasa se abre camino entre las renovables. *Energética XXI*. 2013; 70-1.
14. Zeng, X., Yitai M, Lironga, L. Utilization of straw in biomass energy in China. *Renewable and Sustainable Energy*. Reviews. 2007; 11(5): 976-87.
15. Escalante Hernández, H., Orduz Prada, J., Zapata Lesmes, H. J., Cardona Ruiz, M. C., Duarte Ortega, M. Atlas del Potencial Energético de la Biomasa Residual en Colombia. Bucaramanga: Ministerio de Minas y Energía. 2007.
16. Rivera González, D., Plata Martínez, L., Castro Molano, L., Guzmán Luna, C., Escalante Hernández, H. Aprovechamiento del subproducto sólido de la digestión anaerobia del bagazo de fique (*Furcraea macrophylla*) para el acondicionamiento de suelos. *REVISTA ION*. 2012; 25(1): 25-34.
17. Escalante Hernández, H; Orduz P, J; Viña López, F E. Potencial energético de la Biomasa Residual Vegetal (BRV) del sector arrocero en Colombia. Centro de Estudios e Investigaciones Ambientales (CEIAM). 2012.
18. Tejeda, L., Quintana, J., Pérez, J., Young, H. Obtención de etanol a partir de residuos de poda, mediante hidrólisis ácida e hidrólisis enzimática. *Revista UDCA Actualidad & Divulgación Científica*. 2011; 14(1): 111-6.
19. Lora, E. S., & Andrade, R. V. Biomass as energy source in Brazil. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2009; 13(4): 777-88.
20. Dörmő, N., Bélafi-Bakó, K., Bartha, L., Ehrenstein, U., Gubicza, L. Manufacture of an environmental-safe biolubricant from fusel oil by enzymatic esterification in solvent-free system. *Biochemical Engineering Journal*. 2004; 21(3): 229-34.
21. Alemany, L. J., Larrubia, M. A., Herrera, C., García-Diéguez, M. Hacia la diversificación energética: Bioenergía. *Uciencia*, 2012; 10: 48-51.
22. Jiménez, S. Combustión de biomasa. Obtenido de Repositorio institucional Universidad de Malaga: (2012). Disponible en <http://www.energia2012.es/>
23. Cherubini, F. El concepto de biorrefinería: El uso de la biomasa en lugar de aceite para la producción de energía y productos químicos. *Conversión de Energía y Gestión*. 2010; 51: 1412-21.
24. Giraldo Rivera, O. D. Hidrógeno mediante reformado catalítico con vapor de Subproductos líquidos de Procesos Thermoconversion Biomasa. Medellín: Universidad Nacional de Colombia. 2012.
25. Ciferno, J. P., Marano, J. J. Benchmarking Biomass Gasification Technologies for Fuels, Chemicals and Hydrogen Production. National Energy Technology Laboratory. 2002.
26. García Rojas, M., Aguiar Trujillo, L., Arauzo, J., Sánchez, L. J. Gasificación catalítica de lodos de aguas residuales. *Ingeniería Mecánica*. 2005; 8(2): 15-22.
27. Pérez, J., Borge, D., Agudelo, J. Proceso de gasificación de biomasa: una revisión de estudios teórico-experimentales. Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia. 2010; 52: 95-107.
28. Hernández, J. J., Aranda, G., San Miguel, G., Bula, A. Gasificación of grapevine pruning waste an entrained-flow reactor: gas products, energy efficiency and gas conditioning alternatives. *Global NEST Journal*. 2010; 12(2): 215-27.
29. Lesme-Jaén, R., Martínez, J. D., Viera-Andrade, R., & Silva-Lora, E. E. Evaluación teórica experimental de un sistema avanzado gasificador de biomasa/motor recíprocante para la generación de electricidad (parte I). *Tecnología química*. 2011; 31(2): 53-63.
30. Torres Lozada, P. Perspectivas del tratamiento anaerobio de aguas residuales domésticas en países en desarrollo. *Revista EIA*. 2012; 18: 115-29.
31. Arribas de Paz, R., González Rodríguez, C. A., Vázquez de Prada, J. Determinación del tiempo de residencia en el interior de un digestor. *Escuela Politécnica Superior*. 2005; 245-53.
32. Villanueva Hernandez, J. A., Nájera Aguilar, H. A., Gómez Ramos, J. M., Hernández Lárraga, T. G., Velazco Ortiz, A. F. Generación, caracterización y uso del biogás, producto de la digestión anaerobia de las

excretas de ganado bovino. Lacandonia. 2011; 5(2): 149-58.

33. Da Costa O, O., Vázquez, H. J. Alcoholic fermentation: An option for renewable energy production from agricultural residues. Ingeniería, investigación y tecnología, 2007; 8(4): 249-59.

34. AIE Agencia Internacional de Energía. (AIE) Agencia Internacional de la Energía. Disponible en <http://www.iea.org>.

35. Álvarez Alonso, M; Arquero Hidalgo, A; Martínez Izquierdo, E. Empleo del AHP (Proceso Analítico Jerárquico) incorporado en sig para definir el emplazamiento óptimo de equipamientos universitarios. Aplicación a una biblioteca. Cuadernos Geográficos, 2006; 39: 579 -95.