

## EDITORIAL

# REALIDAD DE LOS POSGRADOS EN COLOMBIA Y SU SITUACIÓN FRENTE A LA REFORMA DE LA LEY 30

Germán Anzola Montero

Rector

El tema que anuncia el precedente titular, refleja nuestra inquietud por abordar un sistema de educación de gran actualidad y de enormes proyecciones para el futuro.

No en balde, hoy día no se concibe que existan estudiantes sin esta distinción que los diferencie de quienes sólo han adquirido la formación educativa básica de carácter superior, dadas sus implicaciones en el mercado laboral y, en general, por las connotaciones que una situación de estas características representa.

A diferencia de otros países, incluidos los de Latinoamérica y Europa, en Colombia, el incremento de los posgrados se ha consolidado en las especializaciones. Así lo indican las estadísticas registradas por el Ministerio de Educación Nacional para el 2010, según, las cuales, el país cuenta con 6.059 Especializaciones, frente a 216 programas de Doctorado y 1.076 de Maestría.

Caso contrario es lo obtenido en otros países de América Latina, como Chile, México, Argentina y Brasil, para no hablar de Estados desarrollados, donde las Maestrías y los Doctorados tomaron impulso y se consolidaron y donde las Especializaciones ni siquiera han desempeñado un papel importante, quedando rezagadas a un tercer plano.

Ante esta panorámica, vale la pena preguntarnos, ¿Qué pasa con la formación avanzada en Colombia? Es claro que los posgrados, aparte de ser pocos en el país, son costosos y presentan problemas de mediana o baja calidad, puesto que de todos los programas de Doctorado, solamente uno tiene Acreditación de Alta Calidad y en Maestrías y en Especializaciones, ninguno y con Registro Calificado: 774 para Maestrías; 129 para Doctorados y 3.037 para Especializaciones.

Y es claro, especialmente, por las condiciones económicas de los profesionales colombianos, quienes con dificultad pueden acceder a una Especialización, pues los indicadores del Ministerio así lo reflejan. En efecto, en el 2002, el 6,21% (aproximadamente, 62 mil personas), se matricu-

laron a la alta formación (350, para Doctorado; 55.023, para Especialización y 6.776, para Maestría), mientras que en el 2010, alrededor de 96 mil profesionales (5,73%), lo lograron (2.392 para Doctorado, 70.247 para Especialización y 24.309 para Maestría). Estas cifras demuestran que Colombia es uno de los países con menos estudiantes de postgrado, cuando su auge está por encima de lo esperado, en otras palabras, es una situación que refleja los problemas de esta oferta interna. En general, el 3,1% de los colombianos tienen posgrado y, además, reporta el Ministerio, que en los últimos 45 años, únicamente el 18% de los profesionales consiguieron cursar un programa de éstos en el país.

Pero si se analiza el caso de profesionales con Doctorado y con Maestría, la situación es dicente; a pesar de haberse elevado el número de egresados en los últimos años, las estadísticas siguen siendo muy bajas, comparadas con otros países. Por ejemplo, en el 2008, en Colombia, 118 personas lograron graduarse en Doctorado y 3.411 en Maestría; en el 2009, 173 y 4.740 y, en el 2010, 202 y 5.797, respectivamente, que comparado con otras naciones, este porcentaje cubre un 34,4%, para Doctorado y un 51,2%, para Maestría.

Especialistas en el tema señalan, como causas destacadas para llegar a esta situación, las siguientes: 1) Alto costo en las matrículas; 2) Baja calidad académica; 3) Solamente existen en las grandes ciudades y no en las regiones; 4) Baja remuneración en el mercado laboral; 5) No se ofrecen mayores alternativas de crédito y 6) Los programas ofrecidos no son los que se necesitan.

En este orden de ideas es pertinente hacer la comparación entre la normatividad vigente y lo que se propone:

### De Ley 30 de 1992:

**“ARTÍCULO 10.** Son programas de postgrado las especializaciones, las maestrías, los doctorados y los post doctorados. **ARTÍCULO 11.** Los programas de especialización son aquellos que se desarrollan con posterioridad

a un programa de pregrado y posibilitan el perfeccionamiento en la misma ocupación, profesión, disciplina o áreas afines o complementarias. **ARTÍCULO 12.** Los Programas de maestría, doctorado y post-doctorado tienen a la investigación como fundamento y ámbito necesarios de su actividad. Las maestrías buscan ampliar y desarrollar los conocimientos para la solución de problemas disciplinarios, interdisciplinarios o profesionales y dotar a la persona de los instrumentos básicos que la habilitan como investigador en un área específica de las ciencias o de las tecnologías o que le permitan profundizar teórica y conceptualmente en un campo de la filosofía, de las humanidades y de las artes. **PARÁGRAFO.** La maestría no es condición para acceder a los programas de doctorado. Culmina con un trabajo de investigación. **ARTÍCULO 13.** Los programas de doctorado se concentran en la formación de investigadores a nivel avanzado tomando como base la disposición, capacidad y conocimientos adquiridos por la persona en los niveles anteriores de formación. El doctorado debe culminar con una tesis”.

#### **Del Proyecto de Ley, presentado ante el Congreso:**

“**ARTÍCULO 63.** Los programas de posgrado son aquellos que se desarrollan con posterioridad a un programa de grado y comprenden los niveles de formación de especialización, maestría y doctorado. **ARTÍCULO 64.** Los programas de especialización tienen como propósito la profundización en los saberes propios de un área de la ocupación, disciplina o profesión de que se trate, el desarrollo de competencias específicas para su perfeccionamiento y una mayor cualificación para el desempeño laboral. **ARTÍCULO 65.** Los programas de maestrías tienen como propósito ampliar y desarrollar los conocimientos para la solución de problemas disciplinares, interdisciplinares o profesionales y dotar a la persona de competencias que le permitan profundizar teórica y conceptualmente en un campo del saber. Las maestrías pueden ser de profundización o de investigación o abarcar las dos modalidades. Las maestrías de investigación enfatizarán en la formación teórica y en el uso, interpretación y evaluación de investigaciones. Esas maestrías incluirán el desarrollo de competencias científicas y una formación en investigación o creación. Las maestrías de profundización enfatizarán en la formación teórica y práctica del estudiante, dotándolo de competencias orientadas hacia un desempeño profesional de alta calificación con niveles de profundización teórica superiores a los de la especialización. **PARÁGRAFO:** Las especializaciones médico-quirúrgicas tendrá el nivel de una maestría, y cuando involucren la formación investigativa, el de un doctorado según el concepto que para tal efecto expida la Comisión Nacional de Aseguramiento de la Calidad de la Educación Superior, CONACES. **ARTÍCULO 66.** Los programas de doctorado

tienen como propósito la formación de investigadores con capacidad de realizar y orientar en forma autónoma procesos académicos e investigativos en un área específica del conocimiento y desarrollar, afianzar o profundizar competencias propias de este nivel de formación. Los resultados de las investigaciones de los estudiantes de este nivel de formación deben contribuir al avance en la ciencia, la tecnología, las humanidades o las artes y deben reflejarse en una tesis doctoral. Los programas de doctorado sólo podrán ser desarrollados por las Universidades y por las Instituciones de Educación Superior que cuenten con Acreditación Institucional de Alta Calidad, de acuerdo con el Sistema de Calidad de la Educación Superior”.

Como se puede observar, según la Ley 30, los Post-Doctorados son considerados como un nivel de formación avanzada, lo cual, a nuestro entender, NO puede ser y así se comprende, oportunamente, con el Proyecto de Reforma de Ley. Por otro lado, siempre han existido serios lineamientos para Maestrías y para Doctorados, pero nunca se han visto con claridad para las Especializaciones, por tal razón, para las instituciones es viable obtener el registro calificado y, por ello, la mayor oferta se centra en las Especializaciones en Colombia. En el 2006, el Ministerio de Educación Nacional expidió el Decreto 1001 (3 de abril de 2006), con la idea de ajustar estos programas de alta formación y así aumentar la oferta de Maestrías y de Doctorados. Según la Ministra de ese entonces, la norma buscaba fortalecer algunas Especializaciones para, posteriormente, convertirlas en Maestrías y así cumplir, en un tiempo no mayor de 15 meses, con ciertos requisitos, para obtener el registro calificado: experiencia de los docentes, impacto del programa en el país e infraestructura. El problema, sin embargo, siempre ha sido la falta de calidad, aspecto que las Universidades reconocen, pero que continúan en la búsqueda de mejorar, puesto que, en la actualidad, se siguen fijando normas de calidad obligatorias.

Entonces, ¿Qué necesita el país? La cantidad de posgrados que se ofrecen en Colombia es poca, teniendo en cuenta que su crecimiento no ha sido tan significativo, en comparación con los existentes en Estados Unidos, en Europa y en algunas Naciones de Latinoamérica. Además, se puede añadir que los ofrecidos por las Universidades no son los que requiere Colombia para su desarrollo, ya que se centran en áreas tradicionales, como Derecho, Salud, Ingeniería, Administración, entre otras y se olvidan de las áreas de Agronomía y de Medio Ambiente.

La U.D.C.A, bajo esta visión, ha contribuido, en menor porcentaje, con dos Maestrías de gran impacto social y económico. Por una parte, la **Maestría en Agroforestería Tropical**, que en convenio con CORPOICA, quiere formar

---

---

profesionales altamente calificados, que contribuyan a la generación de conocimiento e innovación tecnológica en sistemas agroforestales, como estrategias que permitan hacer un uso eficiente y sostenible de la oferta biofísica en los ecosistemas tropicales del país, mejorar las condiciones económicas y sociales de los territorios y disminuir el impacto antrópico sobre los recursos naturales, con miras a cerrar la brecha y la inequidad de la sociedad del medio rural. Y por otra, la **Maestría en Ciencias Ambientales**, cuyo propósito es formar, a nivel avanzado, investigadores que aborden los problemas ambientales, a partir del desarrollo de competencias necesarias para el estudio de las relaciones de los seres humanos con su entorno natural y formular propuestas de prevención y de solución a las dificultades que, en este campo, se requieren, a partir de un enfoque científico, interdisciplinario, transdisciplinario, sistémico, complejo y abierto al diálogo con otros saberes y con todos los sectores. Como se puede advertir, éste es un aporte fundamental de la U.D.C.A como corresponsable social y ambiental para contribuir, favorablemente, a sortear la crisis ambiental del mundo y del país.

La percepción general de los posgrados, infortunadamente, no corresponde a las necesidades del país sino a lo que es bueno, útil o rentable y, ante esta disyuntiva, se le suma la carencia de profesores con un alto nivel de formación, por lo cual, los profesionales con Doctorado, no encuentran el respaldo económico y laboral, para desarrollar sus conocimientos.

Analizando el aspecto económico, ¿Cuánto invierte un profesional para cursar un posgrado y ser después bien remunerado? Según estadísticas del Ministerio de Educación Nacional existen módulos de las Especializaciones desde los \$5 millones hasta los \$15 y \$20 millones; Maestrías (con una duración dos años), las hay desde los \$8 y \$9 millones, para un total de \$30 a \$35 millones y Doctorados (un lapso de tres a cinco años), están alrededor de los \$12 a \$15 millones, para un total de \$60 millones. Por estas razones, un gran número de profesionales prefieren formarse fuera del país, puesto que en Colombia es costoso un posgrado de alto nivel; en cambio, en el exterior, se puede hacer sin costo alguno, en Universidades de Francia, de Alemania y de otros países europeos.

Entonces, ¿Quién tiene acceso a esta formación?, ¿Qué tipo de cobertura académica le podemos brindar a los profesionales colombianos? Las universidades reconocen to-

dos estos problemas y consideran que las normas expedidas por el Ministerio se deben adoptar, ya que ayudarán a elevar los niveles de calidad, pero mientras no exista una unión entre las Instituciones de Educación Superior en la oferta de sus programas y se cree una sana y leal competencia, seguirá existiendo esa brecha entre los niveles de alta formación y de elevado costo y que, obviamente, afectará al país, puesto que solo podrá brindar programas de baja calidad.

En resumen, las Maestrías y los Doctorados, se constituyen en los niveles de educación que deben promover la formación de excelentes investigadores, con el propósito de incrementar la capacidad investigativa, científica y tecnológica del país. Para su fortalecimiento y su consolidación es necesario cumplir con ciertos referentes, la mayoría de ellos, de carácter internacional: 1) Consolidación de proyectos de investigación; 2) Infraestructura de programas; 3) Movilidad de investigadores nacionales y extranjeros y 4) Financiación a estudiantes.

En consecuencia, la ya mencionada reforma a la Ley de Educación Superior debe cumplir con objetivos fundamentales y claros e implementar acciones que conlleven a mejorar la calidad de los posgrados en el país para, Primero: Generar condiciones para una óptima oferta en alta formación y que garantice el mejoramiento de la calidad de los postgrados, en conjunto con el fortalecimiento de la autonomía y la autorregulación de las Instituciones de Educación Superior; Segundo: Propiciar métodos para que un mayor número de profesionales puedan ingresar a los posgrados y se logren graduar, es decir, promover el acceso equitativo, estimular su permanencia, mejorar las fuentes de financiación y fortalecer la participación regional (fuentes de financiación de los recursos del Sistema General de Regalías); Tercero: Acondicionar el Sistema de Educación Superior con la realidad de Colombia y adecuarlo con las tendencias nacionales, regionales e internacionales y Cuarto: Fortalecer los principios de buen gobierno y transparencia en el sector educativo (autonomía institucional y responsabilidad social, en cuanto a la rendición de cuentas ante la sociedad y ante el país).

Este artículo fue elaborado con la colaboración de la Comunicadora Social y Periodista Norella Castro Rojas, Coordinadora de la Oficina de Publicaciones y Patrimonio Intelectual, de la U.D.C.A

# AISLAMIENTO DE *Aeromonas* spp. EN MUESTRAS DE PESCADO FRESCO COMERCIALIZADO EN PAMPLONA (NORTE DE SANTANDER)

## ISOLATION OF *Aeromonas* spp. IN FRESH FISH SAMPLES MARKETED IN PAMPLONA (NORTE DE SANTANDER)

William Suárez Q.<sup>1</sup>, Fanny Herrera A.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Microbiólogo con Énfasis en Alimentos, M.Sc. en Ciencia y Tecnología de Alimentos, Universidad de Pamplona. Docente catedrático. Departamento de Microbiología, Facultad de Ciencias Básicas. e-mail: [aquifex3@hotmail.com](mailto:aquifex3@hotmail.com) <sup>2</sup> Ph.D. Universidad de Pamplona. Docente asociado. Departamento de Microbiología, Facultad de Ciencias Básicas. e-mail: [fannyh@unipamplona.edu.co](mailto:fannyh@unipamplona.edu.co) Grupo de Investigación en Microbiología y Biotecnología (GIMBIO). Ciudad Universitaria. Pamplona Norte de Santander. Colombia.

Rev. U.D.C.A Act. & Div. Cient. 14(2): 7 - 13, 2011

### RESUMEN

Miembros del género *Aeromonas* son reconocidos agentes de enfermedades para el hombre, ocasionando una gran variedad de procesos extraintestinales, así como gastroenteritis. Esta bacteria, se adquiere, principalmente, por el consumo de alimentos de origen acuático, como pescado, mariscos y agua de bebida. Con el fin de determinar la presencia de *Aeromonas* en muestras de pescado comercializado en la ciudad de Pamplona (Norte de Santander), se analizaron un total de 51 muestras de pescado: bagre (*Brachyplatistoma* spp.), trucha (*Oncorhynchus mykiss*), mojarra (*Oreochromis* spp.), rampuche (*Pimelodus navarroii*), bocachico (*Prochilodus magdalenae*), dorada (*Brachyplatystoma flavicans*) y sierra (*Pristis pectinata*); adicionalmente, se comparó la identificación bioquímica tradicional de las cepas, con el kit miniaturizado Microbact™. En 39 muestras, correspondientes al 76,47 %, se confirmó el crecimiento de *Aeromonas* spp. Los resultados mostraron que el mayor nivel de prevalencia de *Aeromonas* spp., se presentó en: trucha (100%) y rampuche (100%), seguida por dorada (80%), bagre (73,33%), bocachico (60%), sierra (60%) y mojarra (50%). El elevado porcentaje de aislamiento de cepas de *Aeromonas* en las muestras indica que el pescado comercializado en Pamplona puede ser vehículo importante para este microorganismo, considerado patógeno emergente para el hombre.

Palabras clave: *Aeromonas*, bacterias emergentes, Microbact, pescado.

### SUMMARY

Members of the genus *Aeromonas* are recognized agents of diseases in humans, which can cause a variety of gastroenteritis and extraintestinal processes, this bacteria is acquired primarily through consumption of waterborne food such as fish, seafood and drinking water. In order to determine the presence of *Aeromonas* in fish samples marketed in Pamplona (Norte de Santander), there were analyzed a total of 51 fresh fish samples: Catfish (*Brachyplatistoma* spp.), Trout (*Oncorhynchus mykiss*), Tilapia (*Oreochromis* spp.), Rampuche (*Pimelodus navarroii*), Bocachico (*Prochilodus magdalenae*), Dorada (*Brachyplatystoma flavicans*) and Sierra (*Pristis pectinata*); additionally, it was compared the traditional biochemical identification of the strains with the miniaturized Microbact™ kit. In 37 samples corresponding to 76.47 %, it was confirmed the growth of *Aeromonas* spp. The results showed that the highest prevalence of *Aeromonas* spp. appeared in: Trout 100% and Rampuche 100%, Dorada 80%, Catfish 73.33%, Bocachico 60%, Sierra 60% and Tilapia 50%. By using the Microbact™, 87% of the strains corresponded to *A. hydrophila*, *A. caviae* 8%, *A. veronii veronii* 2% and *Plesiomonas shigelloides* 2%. The high percentage of isolation of *Aeromonas* strains in the samples indicates that the fish commercialized in Pamplona can be an important vehicle for this microorganism, considered emergent pathogen for humans.

Key words: *Aeromonas*, fish, Microbact, emergent bacteria.

## INTRODUCCIÓN

El pescado y los productos de la pesca son una fuente muy importante de nutrientes, especialmente, de proteína para el hombre; sin embargo, estos alimentos pueden ser fuente de enfermedades, al ser vehículo de patógenos humanos, entre ellos, bacterias emergentes de origen acuático, como *Aeromonas* (Silva *et al.* 2010; Yucel & Balci, 2010).

El género *Aeromonas* está conformado por bacilos Gram-negativos, oxidasa-positivos y anaerobios facultativos; en la actualidad incluye 30 especies y 12 subespecies, con la reciente inclusión de *A. tecta* (Janda & Abbott, 2010). *A. hydrophila*, *A. veronii sobria*, *A. caviae*, *A. jandaei*, *A. schubertii* y *A. trota*, son las especies frecuentemente aisladas de muestras clínicas (Martin-Carnahan & Joseph, 2005; von Graevenitz, 2007); mientras que todas estas especies se han aislado a partir de muestras fecales, *A. hydrophila*, *A. veronii sobria* y *A. caviae* se asocian, habitualmente, con gastroenteritis (Albert *et al.* 2000; Janda & Abott, 2010).

El papel de *Aeromonas* spp., como agente causal de gastroenteritis es debatible, debido a la baja incidencia de grandes brotes epidémicos reportados y a la carencia de un modelo animal adecuado; no obstante, datos epidemiológicos ponen de manifiesto su notable participación en patologías gastrointestinales, llegando a ser en España el tercer agente bacteriano, productor de gastroenteritis (Anónimo, 2003). *Aeromonas* es una bacteria que se aísla con gran asiduidad en pacientes con diarrea (EPA, 2006; von Graevenitz, 2007). Bravo *et al.* (2011), analizando muestras de heces de pacientes con Enfermedad Diarreica Aguda (EDA) en Cuba, aislaron cepas de *A. caviae*, en el 33% y de *A. hydrophila*, en el 29%, de las muestras en las que se logró la identificación hasta especie de las cepas. En Venezuela, se lograron aislar cepas de *Aeromonas* en el 12,5% de heces de pacientes con EDA, siendo las especies recuperadas *A. caviae*, *A. hydrophila* y *A. sobria* (Luzmila *et al.* 2005). En Rusia, más del 8,1% de los casos de EDA fueron ocasionados por *Aeromonas*, consiguiendo aislar las mismas cepas de los pacientes en el agua y en pescado de la región (Novotny *et al.* 2004). En México, *Aeromonas* es una de las bacterias más usualmente involucradas en los episodios de diarrea (Castro-Escarpulli *et al.* 2002).

Se ha relacionado a *Aeromonas* como causante de enfermedades de origen alimentario en el hombre (Novotny *et al.* 2004; Daskalov, 2006). El hombre, se expone a esta bacteria por el consumo de pescado o de derivados insuficientemente cocidos, o por contaminación cruzada con otros alimentos, agua o materias primas, o por manipulación no higiénica de los alimentos (Yucel *et al.* 2005; Newaj-Fyzul *et al.* 2008; Leal *et al.* 2009); es importante mencionar que, aunque se considera a *Aeromonas* como una bacteria termosensible, algunas toxinas pueden resistir tratamientos

de 56°C durante 10 min (Yucel *et al.* 2005; Daskalov, 2006); además, la gran mayoría de cepas ambientales de *Aeromonas* son psicrotróficas, de tal manera que pueden crecer a temperaturas de refrigeración, aumentando el peligro de contaminación por esta bacteria (Novotny *et al.* 2004)

En todo el mundo existen muchos reportes acerca de la presencia de *Aeromonas* en pescado. Salgado-Miranda *et al.* (2010), analizando trucha procedente de piscifactorías en México, indicaron que *Aeromonas* fue la bacteria más frecuentemente aislada; Silva *et al.* (2010) recuperaron *Aeromonas* en el 50% de muestras de pescado procedentes de un Mercado en Sao Paulo, Brasil; Vivekanandhan *et al.* (2005) aislaron *Aeromonas* en el 33,58% de muestras de pescado comercializado en India; Abraham *et al.* (2007) aislaron *Aeromonas* a partir de pescado expendido en Grecia en el 65% de las muestras; Morales *et al.* (2004) detectaron *Aeromonas* a partir del 98% de las tilapias evaluadas en Costa Rica; Newaj-Fyzul *et al.* (2008) identificaron *Aeromonas* en el 44% de muestras de tilapia en Trinidad y Tobago y Ullman *et al.* (2005) analizaron muestras de pescado y derivados en Berlín (Alemania), logrando detectar la presencia de *Aeromonas* en el 32,1% de las muestras; sin embargo, en la revisión realizada, no existen datos relacionados con el aislamiento de *Aeromonas* en pescado en Colombia.

Los objetivos del presente trabajo fueron conocer la prevalencia de *Aeromonas* spp., en muestras de pescado comercializado en la plaza de mercado de la Ciudad de Pamplona (Norte de Santander) y comparar la caracterización bioquímica tradicional de las cepas aisladas, con el método miniaturizado Microbact™.

## MATERIALES Y MÉTODOS

**Número de muestras:** Se realizó una encuesta, aplicando un muestreo para proporciones, con el fin de determinar qué tan frecuente es el consumo de pescado en la ciudad de Pamplona. Los resultados revelaron que del total de la población entrevistada, correspondiente a 256 personas, 163 consumen pescado y, de ellas, 73 lo adquieren en la plaza de mercado de la ciudad, 35 en supermercados, 40 en ventas callejeras y 15 en ventas detalladas. Teniendo en cuenta que la gran mayoría de las personas compran el pescado en la plaza de mercado, se decidió muestrear el pescado expendido en este lugar. Con base en el dato de 73 personas, se aplicó un muestreo para proporciones, con un nivel de confianza del 95%, error del 7,4% y aplicando la fórmula del muestreo para proporciones con población finita, el resultado fue de 51 muestras.

**Muestras:** Se analizaron las siguientes especies de pescado: bagre (*Brachyplatistoma* spp.), 15; trucha (*Oncorhynchus mykiss*), nueve; mojarra (*Oreochromis* spp.), seis; rampuche

(*Pimelodus navarroi*), seis; bocachico (*Prochilodus magdalenae*), cinco; dorada (*Brachyplatystoma flavicans*), cinco y sierra (*Pristis pectinata*), cinco. Estas especies de pescado fueron seleccionadas, debido a la preferencia que reflejaron los consumidores en la encuesta. Los pescados, se hallaban refrigerados al momento del muestreo y procedían, principalmente, de los ríos Magdalena y Orinoco y de piscifactorías de la Provincia de Pamplona. Se tomaron 100g de cada muestra que fueron trasladadas al laboratorio en bolsas estériles, en nevera portátil y fueron analizadas, de manera inmediata, después de su recolección.

**Aislamiento primario *Aeromonas* spp.:** Se realizó un pre-enriquecimiento en agua peptona alcalina (APA); se pesaron, asépticamente, 25g de la muestra y se homogenizaron en 225 ml de agua peptona alcalina APA; se incubó a 30°C por 24 horas. Se inoculó una asada de cultivo, a partir del pre-enriquecimiento, usando el Agar Base Rojo de Fenol, adicionado de Almidón (10%) y Ampicilina (10mg/L); se incubaron a 30°C durante 24 horas (APHA, 2000). Para la identificación, se tuvieron en cuenta las colonias amarillas rodeadas de un halo de aclaramiento, aparecido después de adicionar unas gotas de lugol sobre las mismas; luego, se pasaron a caldo infusión cerebro corazón BHI, más glicerol 30%, para su conservación.

**Identificación preliminar de *Aeromonas* spp.:** A partir de las cepas almacenadas en glicerol, se tomaron 20 µL y se inocularon en Agar Base Rojo de Fenol, incubando a 30°C por 18 horas, comprobando la pureza. Después, las colonias típicas fueron sembradas en Agar Nutritivo para realizar las pruebas de tinción de Gram; actividad citocromo-c-oxidasa; actividad catalasa; oxidación-fermentación de la glucosa.

**Pruebas para la identificación bioquímica tradicional de *Aeromonas* spp.:** Las cepas que fueron bacilos Gram negativos, oxidasa y catalasa positivas y fermentadoras, se transfirieron a Agar Nutritivo y se les continuó realizando las siguientes pruebas:

Resistencia al agente vibriostático O-129; sulfuro-Indol-Movilidad; hidrólisis de la esculina; producción de gas a partir de la D-glucosa; test del rojo de metilo- Voges-Proskauer; descarboxilación de L-lisina y L-ornitina e hidrólisis de la L-arginina; producción de ácido a partir de D-manitol, Salicina, L-arabinosa, Inositol y Sacarosa; prueba de gelatina e hidrólisis del almidón, siguiendo protocolos tradicionales en cada caso.

**Identificación de cepas de *Aeromonas* spp. mediante Microbact™ 24E:** El Microbact™ 24E es un kit miniaturizado de pruebas bioquímicas que permite identificar bacilos aerobios y anaerobios facultativos Gram negativos, entre ellos, *Aeromonas*. Con el fin de comparar la identificación bioquímica tradicional con este kit rápido, a partir de las

cepas almacenadas en glicerol, se tomaron 20µL y se inocularon en Agar Base Rojo de Fenol, incubando a 30°C por 18 horas, con el propósito de comprobar la pureza del cultivo. Después, las colonias típicas fueron sembradas en Agar Nutritivo e incubadas a 30°C por 18 horas; a partir de este cultivo, se inoculó la prueba, siguiendo las instrucciones del fabricante e incubando a 30°C durante 18-24 horas.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En 39 muestras analizadas, correspondiente al 76,47%, se confirmó el crecimiento de *Aeromonas* spp. Teniendo como base los lineamientos establecidos por Abbott *et al.* (2003) en cuanto a la adscripción a especie de *Aeromonas*, se encontró que las especies de *Aeromonas* correspondían, principalmente, a *A. hydrophila* (29,7%) y *A. veronii sobria* (19,1%), seguidas de *A. jandaei* y *A. veronii veronii* (17%), *A. popoffii* (6,4%), *A. caviae/A. media* (4,3%), *A. eucrenophila* (4,3%) y, finalmente, *A. schubertii*, con una prevalencia del 2,1%. Mediante el empleo del kit miniaturizado Microbact™, se halló que el 87% de las cepas correspondía a *A. hydrophila*; el 8% a *A. caviae*; el 2% a *A. veronii veronii*; y el 2% a *Plesiomonas shigelloides*.

La presencia de *Aeromonas* en las muestras de pescado analizadas, se relaciona con los datos obtenidos por Neyts *et al.* (2000), quienes aislaron *Aeromonas* en el 72% de muestras de pescados y de camarones; Yucel *et al.* (2005) aislaron cepas de *Aeromonas* en el 82,8%, de muestras de pez carpa *Cyprinus carpio*, siendo las especies más prevalentes *A. caviae* (66%), seguida por *A. hydrophila* (22,6%) y *A. veronii sobria* (11,6%); Castro-Escarpulli *et al.* (2003) analizaron muestras de tilapia congelada en México, de las cuales, fueron identificadas 82 cepas de *Aeromonas* por métodos bioquímicos tradicionales, siendo las especies más prevalentes *A. salmonicida*, *A. hydrophila*, *A. caviae*, *A. veronii sobria* y *A. eucrenophila*.

La alta prevalencia de cepas de *Aeromonas* en las muestras es importante desde el punto de vista de salud pública, si se tiene en cuenta que estos microorganismos pueden ocasionar una gran variedad de procesos intestinales y extraintestinales, incluyendo bacteriemia, meningitis, infecciones en heridas y en pulmones y Síndrome Urémico Hemolítico (Cabrera *et al.* 2007; Tena *et al.* 2007; Janda & Abott, 2010; Yucel & Erdogan, 2010).

De las especies aisladas, el mayor porcentaje correspondió a *A. hydrophila*, con una prevalencia del 29,7%. González *et al.* (2001), analizando muestras de trucha y lucio, aislaron, principalmente, cepas de *A. hydrophila*, hallando una prevalencia muy cercana a la aquí registrada (29%); Yucel & Balci (2010), observando muestras de pescado de agua dulce procedentes de mercados de Ankara (Turquía), aislaron únicamente cepas de *A. hydrophila*, en el 10% de

las mismas; Davies *et al.* (2001), a partir de muestras de pescados tomadas en diferentes países europeos, detectaron una incidencia de *A. hydrophila* del 40%; Herrera *et al.* (2006), estudiando muestras de pescado de origen marino, aislaron *Aeromonas* spp., con una incidencia del 62%; de éstas, el 48,4% correspondía a *A. hydrophila*; Savitthamani *et al.* (2005), examinando pescado de río, apreciaron una prevalencia del 51,1% para *A. hydrophila* y Boari *et al.* (2008) aislaron *Aeromonas* en todas las muestras de filetes de tilapia en Brasil, siendo la especie más prevalente *A. hydrophila*.

Los resultados del estudio en cuestión no se relacionan con los obtenidos por otros autores, como Radu *et al.* (2003), quienes reportaron que a partir de muestras de pescado tomadas de mercados con venta al público en Malasia, 55%, 11,5% y 2,3% portaban *A. veronii sobria*, *A. hydrophila* y *A. caviae*, respectivamente. Tampoco concuerdan con los resultados de Silva *et al.* (2010) quienes analizando muestras de pescado procedentes de mercados en Sao Paulo (Brasil), aislaron, principalmente, cepas de *A. allosaccharophila*.

El hecho de encontrar un alto porcentaje de *A. hydrophila* en las muestras refuerza la suposición que el pescado representa un riesgo potencial para la salud de los consumidores, ya que esta especie es una de las que expresa más factores de virulencia (Daskalov, 2006; Leal *et al.* 2009), y es la una de la más relacionada con patogenicidad en el hombre (Novotny *et al.* 2004; Tena *et al.* 2007).

Adicionalmente, se lograron aislar especies de *Aeromonas* que se consideran patógenas para el hombre, como son: *A. veronii sobria*, *A. caviae*, *A. jandaei*, *A. veronii veronii* y *A. schubertii*, que han sido aisladas a partir de infecciones en el ser humano (Kannan *et al.* 2001; Martin-Carnahan & Joseph, 2005; EPA, 2006). Por lo tanto, el pescado que se expende en la plaza de mercado de Pamplona puede ser una fuente importante de cepas de *A. hydrophila* y de otras especies de *Aeromonas*, que expresan factores asociados a la virulencia.

Dentro de las especies de pescado, las que mostraron mayor presencia de *Aeromonas* spp., fueron: trucha y rampuche (100%), seguido por dorada (80%), bagre (73,33%), bocachico (60%), sierra (60%) y mojarra (50%). A continuación, se relacionan las especies de *Aeromonas* aisladas de las muestras de pescado (Figura 1). Si se tienen en cuenta que en los resultados de la encuesta realizada previamente a los consumidores para determinar su preferencia por tipo de pescado, la trucha ocupó el segundo lugar después del bocachico y que, en el 100% de las muestras de trucha, se recuperaron especies de *Aeromonas*, correspondiendo el 50% a *A. veronii veronii* y el 20% a *A. hydrophila*, donde se concluye que la trucha es la especie de pescado que representa mayor riesgo potencial para la salud del consumidor y se acentúa, aún más, al considerar que la trucha se encuentra en todas las épocas del año, a diferencia del bocachico, que sólo se halla por temporadas.

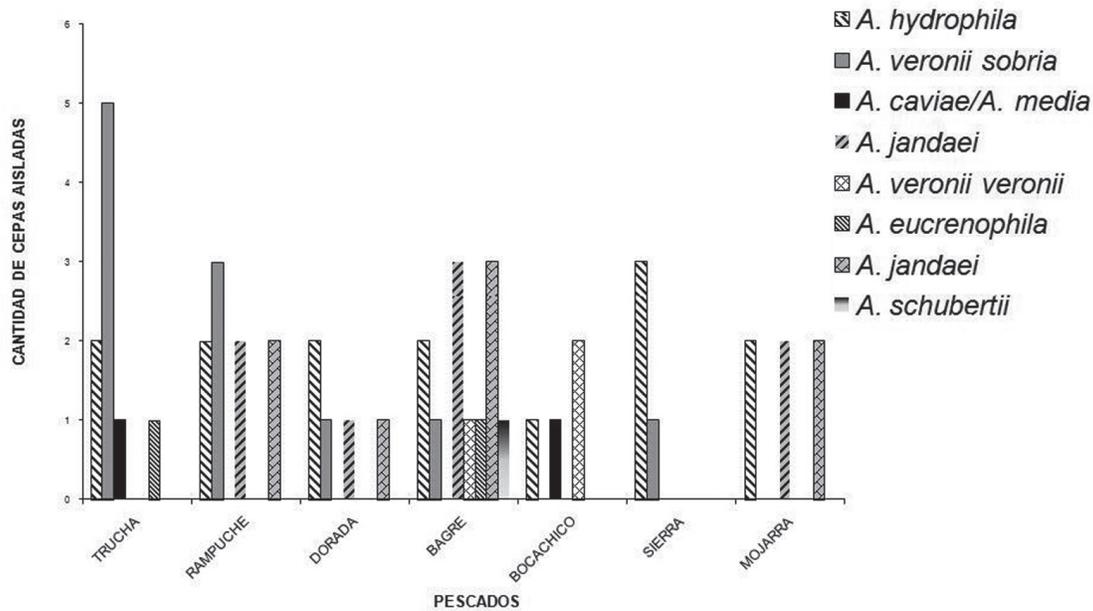


Figura1: Presencia de *Aeromonas* spp. en las diferentes especies de pescado analizadas

En este estudio, el 87% de las cepas identificadas por Microbact™ 24E correspondió a *A. hydrophila*; el 8% a *A. caviae*; el 2% a *A. veronii veronii*; y el 2% a *Plesiomonas shigelloides*, (pero por pruebas bioquímicas tradicionales esta cepa arroja un resultado negativo a la fermentación del m-inositol). Al comparar la identificación bioquímica tradicional con el Microbact™ 24E, el porcentaje de concordancia fue del 27,65%. Las ventajas que ofrecen los métodos miniaturizados, como el Microbact™, es el ahorro de tiempo en la preparación de los medios de cultivo, la minimización de errores en la preparación de los mismos y la facilidad y la rapidez al momento de la inoculación del kit; sin embargo, es un hecho bien reconocido que los kits miniaturizados comerciales identifican de manera incorrecta especies de *Aeromonas* (Janda & Abbott, 2010). Las diferencias de identificación obtenidas a nivel de especie entre el método tradicional y los miniaturizados son, básicamente, debidas a que las bases de datos de estos sistemas son inapropiadas e incompletas, además porque estos métodos no incluyen algunos sustratos clave requeridos para la identificación de especies, como es la reducción de la esculina. A pesar la existencia de métodos genéticos capaces de identificar de forma rápida y fiable todas las especies del género, los laboratorios destinados al diagnóstico clínico siguen utilizando métodos bioquímicos tradicionales, principalmente, en países en vía de desarrollo.

Se determinó que el uso del Microbact™ no fue lo suficientemente fiable para identificar *Aeromonas* a partir de muestras de pescado. Dentro de las limitantes que presentó el método Microbact™ 24E es importante recalcar el bajo poder discriminatorio entre especies, ya que sólo permite la identificación de cuatro especies: *Aeromonas hydrophila*, *A. veronii sobria*, *A. veronii veronii* y *A. caviae*.

La alta prevalencia de *Aeromonas* en las muestras de pescado está relacionada con varias fuentes; en primer lugar, con la contaminación del agua de donde proceden los peces; contaminación secundaria, proveniente de la manipulación; almacenamiento; transporte e incluso durante el expendio, ya que, como se mencionó anteriormente, ésta bacteria es psicrotrófica, logrando crecer a temperaturas de refrigeración o en el hielo que se utiliza para conservar el pescado durante su venta (Ullmann *et al.* 2005; Daskalov 2006; Newaj-Fyzul *et al.* 2008; Silva *et al.* 2010; Yucel & Balci 2010). Por lo anterior, para controlar la presencia de *Aeromonas* en el pescado que se expende en la plaza de mercado de Pamplona es prioritario que los vendedores de pescado implementen Buenas Prácticas de Manufactura, que en las piscifactorías se controle la calidad microbiológica de estanques donde habitan los peces y, finalmente, que el comprador realice una adecuada cocción del pescado antes de consumirlo.

En conclusión, se encontró una alta prevalencia de *Aeromonas* spp., en las muestras de pescado fresco comercializado en

la plaza de mercado de la Ciudad de Pamplona, pudiendo representar un peligro para la salud, especialmente, en niños, en ancianos y en personas inmunosuprimidas. Para confirmar el potencial patogénico de las cepas aisladas es necesario identificar los posibles factores de virulencia de las mismas, aspecto que ya se está siendo investigando por los autores.

**Agradecimientos:** A la Universidad de Pamplona. Facultad de Ciencias Básicas, Departamento de Microbiología, Grupo de Investigación en Microbiología y Biotecnología (GIMBIO).

**Conflictos de intereses:** El manuscrito fue preparado y revisado con la participación de todos los autores, quienes declaramos que no existe ningún conflicto de intereses que ponga en riesgo la validez de los resultados presentados.

**Financiación:** Este estudio fue financiado por el Grupo de Investigación en Microbiología y Biotecnología (GIMBIO). Universidad de Pamplona.

## BIBLIOGRAFÍA

1. ABBOTT, S.L.; CHEUNG, W.K.W.; JANDA, J.M. 2003. The genus *Aeromonas*: biochemical characteristics, atypical reactions, and phenotypic identification schemes. *J. Clin. Microbiol.* 41:2348-2357.
2. ABRAHIM, A.; SOULTOS, N.; STERIS, V.; PAPAGEORGIOU, K. 2007. Incidence of *Aeromonas* spp. in marine fish and the environment of fish markets in northern Greece. *Ital. J. Food Sci.* 19(1):111-116.
3. ALBERT, M.J.; ANSARUZZAMAN, M.; TALUKDER, K.A.; CHOPRA, A.K.; KUHN, I.; RAHMAN, M.; FARUQUE, A.S.; ISLAM, M.S.; SACK, R.B.; MOLLBY, R. 2000. Prevalence of enterotoxin genes in *Aeromonas* spp. isolated from children with diarrhea, healthy controls, and the environment. *J. Clin. Microbiol.* 38(10):3785-3790.
4. ANÓNIMO. 2003. Comentario epidemiológico de las enfermedades de declaración obligatoria y sistema de información microbiológica. España. Año 2002. *Boletín Epidemiológico Semanal* 11:157-168.
5. APHA. 2000. *Compendium of Methods for the Microbiological Examination of Foods*. 3rd ed. APHA. Washington, D.C. 1108p.
6. BOARI, C.A.; PEREIRA, G.; VALERIANO, C.; SILVA, B.; MORAIS, V.; FIGUEIREDO, H.; PICCOLI, R. 2008. Bacterial ecology of tilapia fresh fillets and some factors that can influence their microbial quality. *Ciênc. Tecnol. Aliment. Campinas.* 28(4):863-867.

7. BRAVO, L.; ABREU, A.F.; GONZÁLEZ, D.; RAMÍREZ, M.; AGUILA, A.; CABRERA, N.; MARTÍNEZ, I.; FERNÁNDEZ, C.; SÁNCHEZ, L.; CRUZ, Y. 2011. Caracterización fenotípica de cepas de *Aeromonas* aisladas de pacientes con enfermedad diarreica aguda. *Rev. Cubana Med. Trop.* 63(1):76-80.
8. CABRERA, L.E.; BRAVO, L.; RAMÍREZ, M.M.; LLOP, A.; FERNÁNDEZ, A.; MORIER, L.; BORREGO, G. 2007. Factores de virulencia en cepas de *Aeromonas* spp. aisladas de pacientes con bacteriemia. *Rev. Panam. Infectol.* 9(4):19-23.
9. CASTRO-ESCARPULLI, G.; AGUILERA-ARREOLA, M.; GIONO, S.; HERNÁNDEZ-RODRÍGUEZ, C.; RODRÍGUEZ, M.; SOLER, L.; APARICIO, G.; FIGUERAS, M. 2002. El género *Aeromonas*. ¿Un patógeno importante en México? *Enf. Infec. Micro.* 22(4):206-216.
10. CASTRO-ESCARPULLI, G.; FIGUERAS, M.; AGUILERA-ARREOLA, G.; SOLER, L.; FERNÁNDEZ-RENDÓN, E.; APARICIO, G.; GUARRO, J.; CHACÓN, M. 2003. Characterization of *Aeromonas* spp. isolated from frozen fish intended for human consumption in Mexico. *Int. J. Food Microbiol.* 84:41-49.
11. DASKALOV, H. 2006. The importance of *Aeromonas hydrophila* in food safety. *Food Control* 17:474-483.
12. DAVIES, A.R.; CAPELL, C.; JEHANNO, D.; NYCHAS, G.J.E.; KIRBY, R.M. 2001. Incidence of foodborne pathogens on European fish. *Food Control.* 12:67-71.
13. EPA. 2006. *Aeromonas*: Human health criteria document. Disponible desde Internet en: <http://www.epa.gov/waterscience/criteria/humanhealth/microbial/aeromonas-200603.pdf> (con acceso 09/06/11).
14. GONZÁLEZ, C.J.; SANTOS, J.A.; GARCÍA-LÓPEZ, M.L.; GONZÁLEZ, N.; OTERO, A. 2001. Mesophilic *Aeromonads* in wild and aquacultured freshwater fish. *J. Food Prot.* 64(5):687-691.
15. HERRERA, F.C.; SANTOS, J.A.; OTERO, A.; GARCÍA-LÓPEZ, M.L.; 2006. Occurrence of foodborne pathogenic bacteria in displayed portions of marine fish. *J. Appl. Microbiol.* 100:527-536.
16. JANDA, J.M.; ABBOTT, S.L. 2010. The genus *Aeromonas*: Taxonomy, pathogenicity and infection. *Clin. Microbiol. Rev.* 23:35-73.
17. KANNAN, S.; SURESH, P.K.; KARKUZHALI, K.; CHATTOPADHYAY, U.K.; PAL, D. 2001. Direct detection of diarrheagenic *Aeromonas* from faeces by polymerase chain reaction (PCR) targeting aerolysin toxin gene. *Eur. Rev. Med. Pharmacol. Sci.* 5(3):91-94.
18. LEAL, Y.; REYES, M.; ÁLVAREZ J.; OBREGÓN, J.; VIÑA, X. 2009. Enteropatogenicidad de bacterias aisladas de peces, del agua y plancton de su entorno en Venezuela. *FCV-LUZ.* 19(5):446-454.
19. LUZMILA, A.; SAMPER, I.; GUZMÁN, M. 2005. *Aeromonas* spp. como agente causal de síndrome diarreico agudo en niños menores de 6 años de edad. *Kasmera.* 33:1-7.
20. MARTIN-CARNAHAN, A.; JOSEPH, S.W. 2005. *Aeromonadaceae*. En: Brenner, D.J.; Krieg, N.R.; Staley, J.T.; Garrity, G.M. (eds). *The Proteobacteria, Part B, Bergey's Manual of Systematic Bacteriology*. 2nd Ed. Springer-Verlag, New York. v. 2. p.556-577.
21. MORALES, G.; BLANCO, L.; ARIAS, M.; CHAVES, C. 2004. Evaluación de la calidad bacteriológica de tilapia fresca (*Oreochromis niloticus*) proveniente de la Zona Norte de Costa Rica. *ALAN.* 54(4):433-437.
22. NEWAJ-FYZUL, A.; MUTANI, A.; RAMSUBHAG, A.; ADESIYUN, A. 2008. Prevalence of bacterial pathogens and their anti-microbial resistance in tilapia and their pond water in Trinidad. *Zoonoses Public Health.* 55:206-213.
23. NEYTS, K.; HUYS, G.; UYTENDAELE, M.; SWINGS, J.; DEBEVERE, J. 2000. Incidence and identification of mesophilic *Aeromonas* spp. from retail foods. *Lett. Appl. Microbiol.* 31(5):359-363.
24. NOVOTNY, L.; DVORSKA, L.; LORENCOVA, A.; BERAN, V.; PAVLIK, I. 2004. Fish: a potential source of bacterial pathogens for human beings. *Vet Med- Czech.* 49(9):343-358.
25. RADU, S.; AHMAD, N.; LING, F.; REEZAL, A. 2003. Prevalence and resistance to antibiotics for *Aeromonas* species from retail fish in Malaysia. *Int. J. Food Microbiol.* 81:261-266.
26. SALGADO-MIRANDA, C.; PALOMARES, E.; JURADO, M.; MARÍN, A.; VEGA, F.; SORIANO-VARGAS, E. 2010. Isolation and distribution of bacterial flora in farmed rainbow trout from Mexico. *J. Aquat. Anim. Health.* 22: 244-247.

27. SAVITTHAMANI, K.; VIVEKANANDHAN, G.; THAYUMANAVAN, T.; LAKSHMANAPERUMALSAMY, P. 2005. Occurrence of *Aeromonas hydrophila* in river fish. Asian J. Microbiol, Biotechnol, Environ, Sci. 7(2):261-264.
28. SILVA, M.P.; MATTÉ, G; LEAL, P; MATTÉ, M. 2010. Occurrence of pathogenic microorganisms in fish sold in Sao Paulo, Brazil. J. Food Safety. 30:94-110.
29. TENA, D.; GONZÁLEZ-PRAETORIUS, A.; GIMENO, C.; PÉREZ-POMATA, M.; BISQUERT, J. 2007. Infección extraintestinal por *Aeromonas* spp. revisión de 38 casos. Enferm. Infecc. Microbiol. Clin. 25:235-241.
30. ULLMANN, D.; KRAUSE, G.; KNABNER D.; WEBER, H.; BEUTIN, L. 2005. Isolation and characterization of potentially human pathogenic, cytotoxin producing *Aeromonas* strains from retailed seafood in Berlin, Germany. J. Vet. Med. B 52:82-87.
31. YÜCEL, N.; ASLIM, B.; BEYATLI, Y. 2005. Prevalence and resistance to antibiotics for *Aeromonas* species isolated from retail fish in turkey. J. Food Qual. 28:313-324.
32. YÜCEL, N.; BALCI, S. 2010. Prevalence of *Listeria*, *Aeromonas*, and *Vibrio* species in fish used for human consumption in Turkey. J. Food Prot. 73(2):380384.
33. YÜCEL, N.; ERDOGAN, S. 2010. Virulence properties and characterization of *Aeromonads* isolated from foods of animal origin and environmental sources. J. Food Protect. 73(5):855-860.
34. VIVEKANANDHAN, G.; HATHAB, A.; LAKSHMANAPERUMALSAMY, P. 2005. Prevalence of *Aeromonas hydrophila* in fish and prawns from the seafood market of Coimbatore, South India. Food Microbiology. 22:133-137.
35. VON GRAEVENITZ, A. 2007. The role of *Aeromonas* in diarrhea: A review. Infection. 35(2):59-64.

Recibido: Septiembre 13 de 2010

Aceptado: Agosto 29 de 2011

# INTERACCIÓN DE MICROORGANISMOS BENÉFICOS EN PLANTAS: Micorrizas, *Trichoderma* spp. y *Pseudomonas* spp. UNA REVISIÓN

## A REVIEW OF INTERACTION OF BENEFICIAL MICROORGANISMS IN PLANTS: Mycorrhizae, *Trichoderma* spp. and *Pseudomonas* spp.

Mario Alejandro Cano<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Ingeniero Agrónomo. M.Sc. en Ciencias Agrarias. Docente Facultad de Ingeniería Agronómica. Universidad de Ciencias Aplicadas y Ambientales U.D.C.A, e-mail: mcano@udca.edu.co

Rev. U.D.C.A Act. & Div. Cient. 14(2): 15 - 31, 2011

### RESUMEN

Existe una amplia gama de interrelaciones entre especies de microorganismos en los ecosistemas, tales como sinérgicas, antagónicas, de competencia física y bioquímica, moduladas por múltiples y complejos factores bióticos y abióticos. En la rizósfera, uno de los principales sitios donde se presentan microorganismos, específicamente funcionales, como fijadores de nitrógeno, solubilizadores de fosfatos, promotores del crecimiento vegetal, biocontroladores y especies patogénicas, normalmente, compiten por espacio y por nutrientes. Estas interrelaciones entre microorganismos inciden en la interacción suelo-planta-microorganismos-ambiente y repercuten, de forma directa, en el crecimiento y en el desarrollo de las especies vegetales. Microorganismos rizosféricos, como los hongos formadores de micorrizas arbusculares (AMF), hongos del género *Trichoderma* y bacterias del género *Pseudomonas*, usualmente, catalogados como agentes de control biológico (BCA) y microorganismos promotores del crecimiento vegetal (PGPM), dependen de los factores mencionados para expresar sus potenciales efectos benéficos; sin embargo, en la interacción de estos tres tipos de microorganismos, se pueden presentar efectos sinérgicos, que potencialicen los beneficios o, por el contrario, efectos antagónicos o simplemente que no ocurra ningún efecto en el crecimiento y en el desarrollo de las plantas. De acuerdo a lo anterior, el propósito de esta revisión es brindar información que permita comprender algunas de las interacciones entre microorganismos y, de esta manera, lograr dilucidar la aplicabilidad de la co-inoculación de BCA y PGPM de diferentes especies, con un objetivo común, el control o la regulación biológica de fitopatógenos y, como efecto conjunto y paralelo, la estimulación del crecimiento vegetal.

Palabras clave: Control biológico, microorganismos, promotores del crecimiento, sinergismo, antagonismo.

### SUMMARY

A wide range of interactions between species of microorganisms in ecosystems such as synergistic, antagonistic, physical and biochemical competition, modulated by multiple and complex biotic and abiotic factors do exist. In the rhizosphere, one of the main sites where microorganisms are functional, specifications, such as nitrogen fixers, phosphate solubilizers, plant growth promotion, biocontrol and pathogenic species, usually for space and nutrients are found. These interrelationships between organisms affect the soil-plant-micro-environment and directly influence the growth and development of plant species. Rhizospheric microorganisms such as arbuscular mycorrhizal fungi (AMF), *Trichoderma* fungi and bacteria of the genus *Pseudomonas*, usually classified as biological control agents (BCA) and plant growth promoting microorganisms (PGPM), depend on these factors to express their potential beneficial effects. However, the interaction of these three types of microorganisms can be synergistic, potentializing the benefits or otherwise, antagonistic effects do not occur, being the effect on the growth and development of plants absent. According to the above, the purpose of this review was to provide information to understand some of the interactions between microorganisms and thus to clarify the applicability of the co-inoculation of BCA and PGPM from different species with a common goal, the control or biological control of plant pathogens and as a result set and parallel stimulation of plant growth.

Key words: Biological control, microorganisms, growth promoters, synergism, antagonism.

## INTRODUCCIÓN

Para efectos prácticos de búsqueda de información para el lector, las siglas y las nomenclaturas empleadas, a través del texto, corresponden a las abreviaturas en el idioma inglés, de los temas relacionados en la lista que se muestra a continuación, debido a que al realizar búsquedas con las abreviaturas en español, la información que aparece es poca o nula.

### Lista de abreviaturas en inglés y su significado en español

**BCA:** Agentes de Control Biológico o Biocontroladores, por sus siglas en idioma inglés: Biological Control Agents.

**PGPM:** Microorganismos promotores del crecimiento vegetal, por sus siglas en idioma inglés: Plant Growth Promoting Microorganism.

**PGPR:** Rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal, por sus siglas en idioma inglés: Plant Growth Promoting Rhizobacteria.

**PGPB:** Bacterias promotoras del crecimiento vegetal, por sus siglas en idioma inglés: Plant Growth Promoting Bacteria.

**PGPF:** Hongos promotores del crecimiento vegetal, por sus siglas en idioma inglés: Plant Growth Promoting Fungi.

**PGP:** Estimulación del crecimiento vegetal, por sus siglas en idioma inglés: Plant growth promoting.

**AMF:** Hongos formadores de micorrizas arbusculares, por sus siglas en idioma inglés: Arbuscular Mycorrhizal Fungi.

**AMFB:** Bacterias del suelo asociadas a los hongos formadores de micorrizas arbusculares, por sus siglas en idioma inglés: Soil bacteria associated with arbuscular mycorrhizal fungi.

**Inoculación:** Para este caso, introducción de un microorganismo en el sistema con un fin determinado BCA y PGPM.

**Co-inoculación:** Introducción de más de un microorganismo en el sistema.

La multifuncionalidad de los microorganismos en los sistemas agrícolas, se expresa de acuerdo a una serie de factores bióticos, como la competencia con otros microorganismos, la composición biológica del suelo, el reconocimiento planta-

microorganismo y viceversa. Igualmente, factores abióticos, como la climatología, las características físicas y químicas del suelo, que influyen directamente en el tipo de interacción de estos organismos y la expresión de los efectos benéficos o detrimentales, determinantes en el desarrollo de las especies vegetales (Marschner & Timonen, 2005; Harman, 2006; Hoitink *et al.* 2006; Siddiqui & Akhtar, 2008; Radjacommare *et al.* 2010).

La interacción de microorganismos rizosféricos, como los hongos formadores de micorrizas arbusculares (AMF), hongos del género *Trichoderma* y bacterias del género *Pseudomonas*, usualmente catalogados como agentes de control biológico (BCA) y microorganismos promotores del crecimiento vegetal (PGPM), dependen de este tipo de factores para expresar sus potenciales efectos benéficos; sin embargo, las interacciones entre los microorganismos son complejas y se pueden presentar efectos sinérgicos que potencialicen los beneficios para la planta o, por el contrario, efectos antagónicos o, simplemente, que no ocurra ningún efecto.

Es difícil predecir el resultado de las interacciones entre plantas y microorganismos benéficos del suelo y, más aún, entre las especies de microorganismos; no obstante, las comunidades microbianas asociadas con el sistema de raíces, se considera que desempeñan un papel clave en el desarrollo de prácticas agrícolas sostenibles. La respuesta de las plantas a la inoculación depende de las compatibilidades funcionales en la fisiología y en la bioquímica de la interacción, entre los componentes microbianos; así arroja diferentes respuestas, dependiendo de la combinación de los microorganismos (Vázquez *et al.* 2000).

En la presente revisión, se tratará de dar respuesta a los siguientes interrogantes: a) ¿Cuáles pueden ser los efectos benéficos individuales de las especies que integran el consorcio AMF, *Trichoderma* y *Pseudomonas*?; b) ¿Qué incidencia funcional tienen los AMF, *Trichoderma* y *Pseudomonas* en la regulación o control de organismos patógenos en plantas y en la estimulación del crecimiento vegetal?; c) ¿Qué tipo de interacción se presenta entre AMF, *Trichoderma* y *Pseudomonas*?; d) ¿Cuál es el tipo, modo y mecanismos de acción común entre AMF, *Trichoderma* y *Pseudomonas*?

**Metodología:** Para llevar a cabo esta revisión, se tomaron artículos científicos y búsquedas de revistas indexadas, entre el 2000 y 2011, con dos o tres excepciones de años anteriores, todos relacionados con la utilización de microorganismos benéficos en la producción agrícola, las posibles interacciones y su aplicación como BCA y PGPM. Esta revisión tardó alrededor de seis meses y se analizaron más de las 90 referencias citadas en este documento. Las principales revistas de consulta fueron: Biological Control, Phytopatology, Plant

Protection, Crop Protection, Biocontrol Science and Technology, Fungal Ecology, Soil Biology & Biochemistry, Agriculture Ecosystems and Environment, Biosystems, Plant Biology, entre otras.

### Efectos benéficos individuales de las especies que integran el consorcio.

**Hongos formadores de micorrizas arbusculares (AMF):** Diversos estudios han demostrado los efectos benéficos de la asociación simbiótica entre los AMF y las plantas (Gosling *et al.* 2006; Franken *et al.* 2007; Akhtar & Siddiqui, 2008; Kapoor *et al.* 2008), tales como:

- Incremento en la superficie de absorción, de agua y de nutrimentos, de los pelos radiculares, más la que se produce por la cobertura producida por el hongo.
- Incremento de la vida útil de las raíces absorbentes.
- Mejoramiento de la absorción iónica y acumulación eficiente, especialmente, en el caso del fósforo.
- Solubilización de minerales que se encuentran en el suelo, facilitando su absorción por las raíces de las plantas.
- Aumento de la capacidad fotosintética de la planta, por ende, la producción de biomasa de las plantas.
- Resistencia de raíces a infecciones causadas por patógenos, ocupación de los espacios radiculares.
- Incremento de la tolerancia de las plantas a toxinas del suelo (orgánicas e inorgánicas), valores extremos de acidez del suelo.
- Disminuye el estrés causado por factores ambientales.

Finlay (2004) menciona que, recientemente, existe una mayor atención en observar la interacción de los AMF con las comunidades microbianas de la rizósfera y las repercusiones en las plantas hospedadoras. La nueva perspectiva incluye el estudio de la multifuncionalidad de los AMF, en procesos como:

- Movilización de N y P a partir de polímeros orgánicos.
- Posible liberación de nutrientes de las partículas minerales o de roca.
- Efectos sobre el ciclo del carbono.
- Interacciones con plantas heterótrofas.
- Mediación de respuestas de las plantas a factores de estrés, como la sequía, la acidificación del suelo y la salinidad (Beauchamp *et al.* 2009).
- Biorremediación de suelos contaminados con compuestos tóxicos y metales pesados (Cheung *et al.* 2008).
- Protección contra patógenos de plantas.
- Posibles interacciones con grupos de otros microorganismos del suelo.
- Inducción de resistencia sistémica en plantas (Hause *et al.* 2007; Hause & Schaarschmid, 2009).

### ***Trichoderma* spp.**

*Trichoderma* (teleomorfo *Hypocrea*) es un género de hongos que se encuentran en los suelos de todas las zonas climáticas

del mundo y son importantes descomponedores de materiales leñosos y herbáceos. *Trichoderma* es un hongo invasor oportunista, que se caracteriza por su rápido crecimiento, por la capacidad de asimilar una amplia gama de sustratos y por la producción de una variedad de compuestos antimicrobianos. Algunas cepas han sido explotadas como agentes de control biológico (BCA) de patógenos, incluyendo hongos y nematodos, todo mediado por la producción de enzimas de degradación de la pared celular, como: celulasas, quitinasas, glucanasas, entre otras, y la producción de antibióticos. También, han sido usadas en biorremediación, por su capacidad de degradar hidrocarburos, compuestos clorofenólicos, polisacáridos y los plaguicidas xenobióticos, utilizados en la agricultura (Verma *et al.* 2007; Vinale *et al.* 2008a; Hoyos *et al.* 2009). Igualmente, debido a la existencia de transposones ABC en sus moléculas (Hoyos *et al.* 2009), se considera estimulador del crecimiento vegetal (Leandro *et al.* 2007) e inductor de resistencia sistémica, debido a que modula o estimula algunas respuestas en la planta (Howell & Puckhaber, 2005; Howell, 2006).

Entre los efectos positivos de la inoculación de plantas con *Trichoderma* (Harman *et al.* 2004; Harman, 2006), se incluyen:

- Control biológico de enfermedades causadas por patógenos en la raíz y en algunos foliares.
- Inducción de resistencia sistémica en las plantas.
- Cambios en la composición de la microflora de las raíces.
- Mejora la absorción de nutrientes, incluyendo, pero no limitado, al nitrógeno.
- Mejora de la solubilidad de los nutrientes del suelo.
- Mayor desarrollo de las raíces.
- Aumento de la formación de pelos radiculares.
- Más profundo enraizamiento.

### ***Pseudomonas* spp.**

Estas bacterias pueden ejercer un efecto benéfico directo, a través de la síntesis de fitohormonas y de vitaminas, estimulación de la germinación de semillas y emergencia de plántulas, inhibición de la síntesis de etileno, solubilización de fósforo (P) inorgánico. De manera indirecta, por medio de síntesis de antibióticos y fungicidas, competencia por nutrientes, producción de sideróforos o por la inducción de la resistencia sistémica a patógenos. Pueden también actuar como BCA, capaces de proteger a las plantas de la infección, causadas por agentes fitopatógenos (Siddiqui & Shaukat, 2003; Alves *et al.* 2004; Fgaier *et al.* 2008; Rosas *et al.* 2009).

En virtud de su capacidad de adaptación fisiológica y versatilidad metabólica, las bacterias en las zonas de raíces de las plantas son un agente clave del cambio del suelo en los agroecosistemas, con efectos positivos, en cuanto a tole-

rancia de altos contenidos de sales, aumento en los rendimientos de los cultivos y mejoras en la calidad del suelo, respecto a la disponibilidad de nutrientes; sin embargo, esta regulación está mediada por el quórum sensing de las bacterias, las cuales, se deben adaptar para alcanzar una alta proliferación y, de esta manera, se estimulan, se activan y se mantienen en la zona radicular, por medio de la liberación selectiva de los exudados y lixiviados, por parte de las plantas y otros microorganismos (Brown, 2010).

A su vez, las bacterias de la rizósfera son capaces de generar una amplia variedad de metabolitos secundarios, que pueden tener una influencia positiva (Sturz & Christie, 2003), sobre:

- El crecimiento y desarrollo de las plantas.
- Mejoran la disponibilidad de minerales y nutrientes en el suelo.
- Mejoran la capacidad de fijación de nitrógeno.
- Disminuyen la susceptibilidad a las heladas.
- Mejoran la sanidad vegetal, a través del control biológico de fitopatógenos.
- Inducen en las plantas la resistencia sistémica a las enfermedades.
- Facilitan el establecimiento de plantas.

De acuerdo a lo anterior, son muchos los beneficios que se le atribuyen a este tipo de microorganismos, cuando son estudiados de forma individual, ya que cada especie presenta capacidades específicas para ser utilizadas como PGPM y BCA; no obstante, esto no quiere decir que cada función se cumpla por separado. Las tres especies en estudio muestran la multifuncionalidad de sus bondades expresadas en los efectos benéficos, en cuanto a la estimulación del crecimiento vegetal y la protección directa contra patógenos edáficos, principal e indirectamente, contra patógenos aéreos.

En cuanto a la influencia en el estado nutricional y en la promoción del crecimiento y desarrollo de las plantas, bien sea por el aporte de agua y de nutrimentos entre otros, como en el caso de los AMF (aumento en la exploración del suelo, más allá de la zona de agotamiento de nutrientes y de agua) o en la solubilización de compuestos orgánicos y producción de metabolitos secundarios, que actúan de forma análoga a las fitohormonas, influye, directamente, en la disponibilidad de nutrientes y en la estimulación del crecimiento vegetal, como en el caso de *Pseudomonas* spp. y *Trichoderma* spp.

De igual forma, los tres microorganismos comparten el efecto en la estimulación del sistema de defensa de las plantas, lo cual, confiere, en éstas, cierto tipo de tolerancia al ataque de patógenos aéreos. Por otra parte, el establecimiento, la adaptación y la posible interacción sinérgica entre los antagonistas en la zona rizosférica, protegen a la planta contra patógenos edáficos, atribuyéndoles a los antagonistas,

como un modo de acción directo, la competencia por espacio y por nutrientes e, indirecto, la producción de compuestos antimicrobianos, que regulan o truncan el avance de los patógenos hacia el sistema radicular.

#### **Incidencia funcional del consorcio en la regulación o control de organismos patógenos en plantas y la estimulación del crecimiento vegetal.**

Se ha demostrado que los PGPM, incluyendo PGPR, PGPB, bacterias diazotróficas, fijadores de nitrógeno de vida libre y AMF, tienen un efecto directo o primario en la nutrición vegetal y, por ende, en la estimulación del crecimiento de las plantas; no obstante, estudios recientes muestran la potencialidad del uso de estos inoculantes, como BCA, considerándolo como un efecto secundario de esta interacción. De hecho, *Rhizobium* y *Glomus* spp. pueden promover el crecimiento de las plantas y la productividad (efecto primario), pero ahora han mostrado jugar también un papel en la reducción de la enfermedad (efecto secundario) (Guo *et al.* 2004; Aliye *et al.* 2008; Yasir *et al.* 2009). BCA como *Trichoderma* spp. y *Pseudomonas* spp. pueden controlar enfermedades en plantas (efecto primario), recientemente, se ha mostrado un efecto en la estimulación del crecimiento de la planta en la ausencia de patógenos (efecto secundario). La figura 1, representa algunos de los efectos primarios y secundarios, de acuerdo al tipo de microorganismo (PGPM ó BCA) y de los beneficios que aportan éstos a las plantas.

Bacterias y hongos de la rizósfera pueden producir sustancias aleloquímicas o antibióticos que impiden el desarrollo de enfermedades causadas por patógenos edáficos en las plantas (Sturz & Christie, 2003). Otro factor relevante del uso de los PGPM es la estimulación del sistema de defensa de las plantas; diferentes especies de PGPR, solas o en mezclas y algunos PGPF, se podrían utilizar como elicitores, para inducir la resistencia sistémica contra diversas enfermedades producidas por agentes causales, como: *Ralstonia solanacearum*, *Colletotrichum gloeosporioides*, *Rhizoctonia solani*, *Alternaria solani*, *Fusarium oxysporum* (Jetiyanon & Kloepper, 2002; Latha *et al.* 2009, Mohandas *et al.* 2010). Las plantas pueden ser inducidas a desarrollar una mayor resistencia a los patógenos, mediante el tratamiento, con una variedad de inductores bióticos y abióticos. La resistencia inducida es de amplio espectro y puede ser de larga duración, pero rara vez proporciona un control completo de la enfermedad. Una posible razón para esto es que las plantas en el campo ya están inducidas, a través de sus continuas interacciones con el entorno biótico y abiótico (Walters, 2009)

#### **Efectos sinérgicos y antagónicos de la interacción entre AMF, *Trichoderma* y *Pseudomonas*.**

El mutualismo entre las especies muestra un efecto desestabilizador en la dinámica de la comunidad. De hecho, se pue-

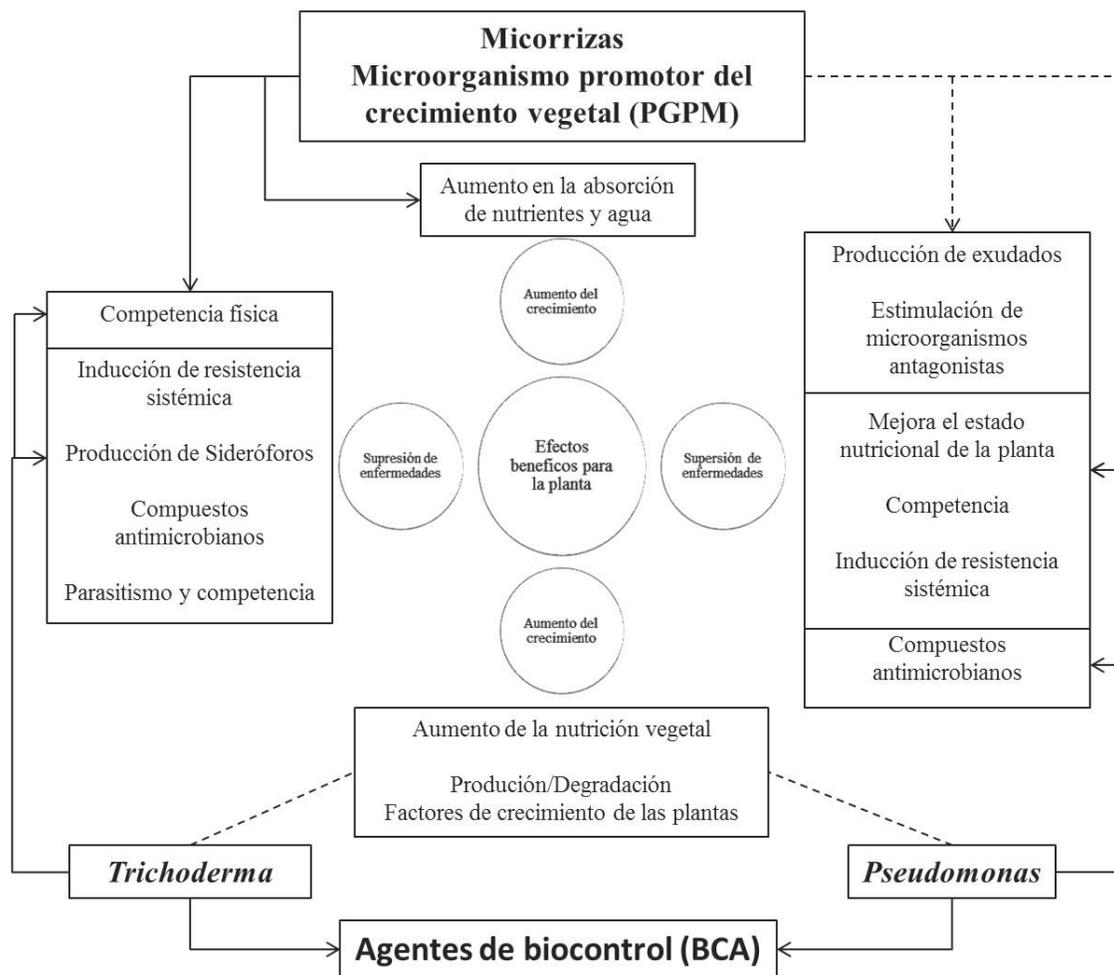


Figura 1. Efectos benéficos de los microorganismos promotores del crecimiento vegetal (PGPM) y agentes de control biológico (BCA) sobre las plantas. Líneas continuas, efecto primario, líneas de guión efecto secundario (Adaptado de Avis *et al.* 2008).

den presentar tales tipos de competencias entre especies de microorganismos relacionados taxonómicamente, como de especies lejanas, que depriman el crecimiento de las plantas y, por ende, el mutualismo se puede ver afectado y redirigirse hacia un parasitismo (Neuhauser & Fargione, 2004). También se puede manifestar incompatibilidad entre los microorganismos que se combinan o se mezclan (Oyekanmi *et al.* 2007). Esto se puede deber a que las interacciones mutualistas, generalmente, no son estables, debido a diversos factores bióticos y abióticos. Al respecto, Bae & Knudsen (2005) mencionan que el crecimiento de hifas y la eficacia de biocontrol de *Trichoderma harzianum* puede depender de su interacción con los componentes bióticos del medio ambiente y del suelo.

Neuhauser & Fargione (2004) adaptaron el modelo Lotka-Volterra, generalmente utilizado para el estudio de interacciones parasitarias, con el fin de observar tanto efectos positivos como negativos entre especies y mostrar cómo se pueden aplicar a los cambios mutualismo-parasitismo. De allí, plantearon dos preguntas: 1) ¿Qué factores determinan si una especie se comporta como un mutualista o un parásito? y, 2) ¿Cuáles son los factores de control de los resultados de la competencia entre un parásito y un mutualista? Con el fin de dar respuesta a estos interrogantes, analizaron la relación mutualista entre AMF y plantas.

La interacción entre el simbionte (el hongo) y su hospedante (la planta) consiste en transferencia de nutrientes: la planta

proporciona al hongo compuestos de carbono y el hongo suministra nutrientes, como fósforo, a la planta. Una planta se puede beneficiar de una infección con AMF, especialmente, en suelos con baja disponibilidad de fósforo; la transferencia de carbono de la planta al hongo puede disminuir en estas condiciones, mientras que la transferencia de nutrientes del hongo a la planta puede aumentar. Un aumento en la fertilidad del suelo puede, a su vez, producir el efecto contrario y convertir una relación mutualista en una relación parasitaria. El cambio de mutualismo al parasitismo ocurre, porque como el recurso limitante es más abundante (P), el beneficio relativo de las micorrizas suministro de nutrientes, se reduce. En primer lugar, como los beneficios de la planta se vuelven menos importantes al aumentar la fertilidad del suelo, la interacción entre el hongo y su hospedante se vuelve parasitaria. Segundo, las interacciones competitivas entre dos cepas de MA puede mostrar un cambio a favor de un parásito y esto ocurre cuando el mutualista tiene una mayor tasa de crecimiento, pero el parásito es un buen competidor (Neuhauser & Fargione, 2004).

Estas relaciones sinérgicas o antagónicas entre microorganismos han sido poco documentadas; sin embargo, crece el interés de utilizar diversos microorganismos, con el objetivo de proporcionarle a la planta protección contra patógenos y, al mismo tiempo, promover el crecimiento vegetal. En este sentido, Chandanie *et al.* (2009) mostraron que la inoculación combinada o co-inoculación de AMF *Glomus mosseae* y PGPF, como *Penicillium simplicissimum* GP17-2 y *Trichoderma harzianum* GT3-2 en plantas de pepino (*Cucumis sativus* L.), suprimieron la enfermedad damping-off, ocasionada por uno de los agentes causales *Rhizoctonia solani*; notaron que *G. mosseae* reducía la incidencia de la enfermedad, si era previamente inoculado en las plantas antes que el patógeno. Igualmente, observaron que la inoculación combinada de *T. harzianum* con *G. mosseae* aumentó el porcentaje de colonización radical de las AMF. En contraste, la presencia de *G. mosseae* disminuyó el desarrollo de la población de *T. harzianum* alrededor de las raíces; sin embargo, el crecimiento de *P. simplicissimum* no se afectó. La co-inoculación de *G. mosseae* con *T. harzianum* mostró sinérgicamente un mayor crecimiento de las plantas. Curiosamente, los niveles de protección contra las enfermedades alcanzado por la inoculación de cada una de las especies solas, *P. simplicissimum*, *T. harzianum* y *G. mosseae* fue aumentando significativamente, mediante la inoculación combinada de cada PGPF con *G. mosseae*.

Así mismo, Akhtar & Siddiqui (2008) observaron los efectos de la co-inoculación de *G. intraradices*, *Rhizobium* sp. y *Pseudomonas straita* en el complejo de la enfermedad de la pudrición de la raíz del garbanzo, causada por *Meloidogyne incognita* y *Macrophomina phaseolina*, mostrando que la

presencia de *P. straita* y *Rhizobium* en co-inoculación aumentaron la colonización de raíces por *G. intraradices*. La inoculación con *Rhizobium* causa mayor reducción en la multiplicación de los nematodos, seguido por *P. straita* y *G. intraradices*. La reducción máxima de la multiplicación de los nematodos, se observó cuando *G. intraradices* fue inoculado conjuntamente con las bacterias. De igual manera, se ha observado que los exudados de las AMF estimulan el crecimiento de las PGPB y presentan un posible efecto antagónico en contra del crecimiento de los nematodos (Gera & Cook, 2005).

Malusa *et al.* (2007) evaluaron el efecto en el crecimiento y en los cambios morfológicos de las raíces de los cultivares de fresa Senga Sengana, Kent y Elsanta, tratados con una mezcla de cinco especies de *Glomus* (*G. mosseae*, *G. intraradices*, *G. caledonium*, *G. viscosum* *G. coronatur*), un hongo del suelo (*Trichoderma viride*) y tres especies de bacterias de la rizósfera (*Bacillus subtilis*, *P. fluorescens* y *Streptomyces* spp.) y fertilizantes foliares, observando diferencias marcadas en el crecimiento de las raíces en los tres cultivares que podrían ser relacionados con la modificación de los procesos de la rizósfera por la actividad de microorganismos y la respuesta genotípica de los cultivares a la inoculación. De igual forma, Gryndler *et al.* (2002) hallaron un efecto positivo en el crecimiento de las plantas de fresa inoculadas, pero sólo para algunas combinaciones de las especies de *Glomus* con las cepas de bacterias.

Bennett & Whipps (2008) mencionan que el establecimiento o adaptación de plántulas provenientes de cultivos *in vitro* es una técnica que requiere diversos cuidados para disminuir los altos índices de mortalidad en la fase inicial de este proceso. Para mejorar el establecimiento y reducir la mortalidad de plántulas realizaron una aplicación de cuatro microorganismos benéficos seleccionados (*P. chlororaphis* MA342, *P. fluorescens* CHA0, *Clonostachys pitiriasis* IK726d11 y T22 *T. harzianum*) a las semillas de cebolla y zanahoria, notando que todos los microorganismos aplicados disminuyeron la mortalidad de las plántulas y estimularon el establecimiento. De igual forma, advirtieron diferencias en los patrones de supervivencia de los microorganismos en las semillas y en el establecimiento de las plántulas, a través del experimento. Datos similares reportaron Wright *et al.* (2003), utilizando cinco PGPM o BCA, como: *P. fluorescens* CHA0, *Pseudomonas* sp. AB842, MBI600 *B. subtilis*, T22 *T. harzianum* y *T. vires* del G-20, notando la proliferación de los microorganismos en las semillas de zanahoria, de chirivía y de puerro; sin embargo, sugieren que se debe evaluar más la aplicación de los microorganismos a las semillas durante el establecimiento.

Se ha comprobado que los AMF inducen cambios en la composición de los exudados de las raíces modificando la

estructura de la comunidad bacteriana de la rizósfera, lo que lleva a la formación de la micorrizosfera, por lo cual, pueden ser utilizados como BCA de enfermedades del suelo; el efecto de los AMF sobre las bacterias de la rizósfera no estaría mediada por los compuestos presentes en los exudados de las raíces de las plantas sino más bien por factores físicos o químicos de compuestos volátiles o superficiales asociados con el micelio del hongo y el sustrato (Lioussanne *et al.* 2010). En otras investigaciones, se ha observado claramente el efecto del micelio externo de los AMF, siendo éste inhibitorio cuantitativo y cualitativo en las comunidades de distintos microorganismos del suelo (Welc *et al.* 2010). En contraste con lo anterior, se ha percibido que las esporas de los AMF se pueden encontrar asociadas a bacterias del suelo (AMFB). Algunos AMFB podría contribuir a aumentar la capacidad de los AMF para inhibir los patógenos, adquirir nutrientes minerales y modificar el crecimiento de las raíces de plantas. Por otra parte, las rizobacterias asociadas a las AMF son multifuncionales, mejoran la asociación simbiótica, el crecimiento de las plantas y el antagonismo contra patógenos (Bharadwaj *et al.* 2008).

Ravnskov *et al.* (2006) reportan que, a pesar de la mutua inhibición entre los dos inoculantes *Clonostachys rosea* IK 726 y *G. intraradices* BEG87, no se afectó la estimulación del crecimiento en plantas de tomate. Ambos inoculantes sufrieron una marcada influencia de otros microorganismos del suelo, que dificultaron la eficiencia, pero no la efectividad de estos microorganismos, expresada en los beneficios para las plantas.

Una de las inquietudes de la implementación de medidas de control biológico es la compatibilidad de éstas con las actividades inherentes al cultivo, ya sean de control cultural, químico o biológico. Se ha registrado, en diversos estudios, que la compatibilidad de estos inoculantes con el manejo integral de los cultivos, se relaciona con un efecto complementario del manejo y no como supresivo de otras medidas de control (Mommaerts *et al.* 2008). Al respecto, Stanley *et al.* (2010) realizaron un estudio sobre la compatibilidad de Diafentiurón (insecticida que inhibe la síntesis de ATP, que se utiliza ampliamente para el manejo de plagas en cardamomo), con microorganismos antagonistas de patógenos de plantas, como *T. viride* y *P. fluorescens*, notando que diafentiurón tuvo algún efecto inhibitorio sobre el crecimiento micelial de *T. viride*, pero ningún efecto sobre *P. fluorescens*. Por lo tanto, pueden ser utilizados simultáneamente para el control de insectos plaga y enfermedades de las semillas transmitidas por el suelo.

Por otra parte, el sulfato de manganeso puede ser utilizado en mezcla con *T. harzianum* para el control de *Fusarium oxysporum* en plantas de alfalfa, notando que es posible el

uso de algunos fertilizantes en mezcla con antagonistas de patógenos del suelo y que esta práctica muestra la compatibilidad de los recursos utilizados (Adhilakshmi *et al.* 2008). Al respecto, Siddiqui & Akhtar (2008) mencionan que la adición de abonos orgánicos puede mejorar la multiplicación y la eficiencia de los hongos antagonistas en la rizósfera. Incluso, en programas de revegetalización en zonas con altos contenidos de Fe, la doble inoculación de rizobios y AMF presentaron un efecto sinérgico, que benefició el crecimiento de las especies vegetales, debido al aumento en la absorción de nitrógeno y de fósforo, estimado en la biomasa de las plantas, que se tradujo en un índice de aumento en la disponibilidad de nutrientes en el suelo, la supervivencia de las plantas, los contenidos de materia orgánica del suelo y la capacidad de retención de agua (Matias *et al.* 2009). Otros ejemplos al respecto de las interacciones sinérgicas o antagonistas entre los inoculantes microbianos BCA o PGPM, se muestran en el cuadro 1.

No cabe duda de la complejidad de las interacciones entre microorganismos, específicamente AMF, *Trichoderma* y *Pseudomonas*; de hecho, se pueden encontrar, normalmente, relaciones antagonistas o sinérgicas en cuanto al establecimiento, adaptación y proliferación de las especies en la rizósfera, mediado o modulado por la producción de compuestos antibióticos por parte de los microorganismos. Por ejemplo, *Trichoderma* produce compuestos anti-fúngicos, que deprimen la colonización radicular por parte de los AMF y, por el contrario, exudados del micelio de los AMF, pueden estimular la presencia de bacterias, como *Pseudomonas*, en la rizósfera. Por otra parte, es fundamental entender que aunque se manifieste este tipo de distorsiones en la comunidad microbiana adyacente a las raíces de las plantas, los efectos en el beneficio de las plantas, debida a la co-inoculación, se mantiene, logrando proporcionar un control de enfermedades y una estimulación del crecimiento de las plantas. Es posible que las acciones de estos microorganismos sean complementarias en el beneficio para las plantas aun cuando la competencia de las especies se presente.

Sin embargo, todo este proceso no solamente está mediado por la interacción de los microorganismos, sino por las condiciones del entorno que hacen posible que los beneficios de los inoculantes se expresen en las especies vegetales.

Es difícil entender por completo el funcionamiento de un sistema biológico (Brimner & Boland, 2003). La complejidad de las interacciones planta-suelo-microorganismos-ambiente son variadas; una comprensión completa de todas las relaciones en cuestión es poco probable; sin embargo, los efectos benéficos de las interacciones biológicas que estimulan los rendimientos de los cultivos y mejoran la sanidad de las plantas pueden ser evaluados y quedar en evidencia algu-

Cuadro 1. Ejemplo de algunas interacciones sinérgicas y antagónicas entre los inoculantes microbianos BCA o PGPM.

Cultivo	Enfermedad y Agente causal	Agente de control biológico BCA	Interacción entre antagonistas	Interacción	Efecto de la interacción	Bibliografía
Tomate	Nematodo del nódulo radicular. <i>Meloidogyne incognita</i>	<i>Paecilomyces lilacinus</i> <i>Pochonia chlamydosporia</i> <i>T. harzianum</i> <i>Gliocladium virens</i> <i>P. putida</i> <i>Glomus intraradices</i>	Hongos antagonistas vs <i>P. putida</i> . <i>G. intraradices</i> vs Hongos antagonistas	Antagónica  Antagónica	Disminución del parasitismo de los hongos antagonistas. Disminución en la colonización radical de los AMF	Siddiqui & Akhtar, 2008.
Soja	Nematodo del nódulo radicular. <i>Meloidogyne incognita</i>	<i>Glomus mosseae</i> , <i>Bradyrhizobium japonicum</i> <i>Trichoderma pseudokoningii</i>	<i>G. mosseae</i> vs <i>T. pseudokoningii</i>	Antagónica	Incompatibilidad entre los organismos con efectos en la brotación de las raíces de las plantas	Oyekanmi et al. 2007.
Maní	Pudrición radicular <i>Sclerotium rolfsii</i>	<i>Trichoderma viride</i> <i>T. harzianum</i> <i>Pseudomonas fluorescens</i>		Sinérgica	Disminución de la enfermedad.	Karthikeyan et al. 2006a.
Maní	Pudrición radicular <i>Macrophomina phaseolina</i>	<i>Trichoderma viride</i> <i>T. harzianum</i> <i>Pseudomonas fluorescens</i>	<i>T. viride</i> vs <i>P. fluorescens</i>	Sinérgica	Disminución de la enfermedad	Karthikeyan et al. 2006b.
Maní	Producción de aflatoxinas <i>Aspergillus flavus</i>	<i>Pseudomonas fluorescens</i> <i>Bacillus</i> spp. <i>Trichoderma</i> spp.		Sinérgica	Disminución de la enfermedad	Anjaiah et al. 2006.
Banano	Marchitamiento o mal de Panamá. <i>Fusarium oxysporum</i> f. sp. cubense (raza 1)	<i>Trichoderma harzianum</i> <i>Pseudomonas fluorescens</i>		Sinérgica	Supresión de la enfermedad en ensayos in vitro	Mohandas et al. 2010.
Alfalfa	Marchitez de la alfalfa <i>Fusarium oxysporum</i> f. sp. Medicaginis	<i>Trichoderma harzianum</i> <i>Pseudomonas fluorescens</i>		Sinérgica	Reducción significativa de la incidencia de la enfermedad	Adhilakshmi et al. 2008
Cebolla	Tizón de la hoja <i>Alternaria palan- dui</i>	<i>Bacillus subtilis</i> <i>Trichoderma viride</i> <i>Pseudomonas fluorescens</i>		Sinérgica	Supresión de la enfermedad	Karthikeyan et al. 2008.
Manzano	Pudrición radical de corona <i>Phytophthora cactorum</i>	<i>Clonostachys rosea</i> <i>Trichoderma harzianum</i>		Sinérgica	Supresión de la enfermedad	Carreño et al. 2006.

nas estrategias generales de la interacción (Sturz & Christie, 2003).

No solamente los factores mencionados son importantes para el desarrollo de las interacciones entre planta-suelo-microorganismos-ambiente; algunas prácticas culturales, como la mecanización, la rotación de cultivos, la utilización del riego, entre otras, modulan la interacción (Douds & Millner, 1999). De igual forma, la amplia variación genética dentro de especies de microorganismos, al igual que en las plantas, explica la necesidad de desarrollar combinaciones específicas de las cepas microbianas con mayor eficacia para una especie vegetal y para conocer la respuesta de éstas en diferentes condiciones ambientales (Malusa *et al.* 2007). Incluso, en plantas dioicas o monoicas, la interacción con los

microorganismos difiere, aunque rara vez ha sido estudiado (Varga & Kyöviita, 2010). Otro aspecto, son las prácticas de fertilización, las cuales, han demostrado modular la eficiencia de la simbiosis AMF respecto al efecto benéfico en el crecimiento de las plantas (Sharma & Adholeya, 2004); no obstante, poco se sabe sobre el efecto de la fertilización foliar sobre las relaciones entre los microorganismos de la rizósfera y las plantas. La fertilización foliar parece afectar también este tipo de interacciones (Cuadro 2) (Malusa *et al.* 2007).

De acuerdo a lo anterior, en la figura 2, se propone un esquema que integre y que trate de explicar los factores que modulan la interacción planta-suelo-microorganismos-ambiente; la parte superior derecha de la figura hace referencia a la importancia de la genética, tanto de las plantas como de los

Cuadro 2. Tipos de efectos antagónicos AMF, *Trichoderma* spp. y *Pseudomonas* spp.

BCA	Tipo de antagonismo	Modo	Mecanismo	Ejemplo
Micorrizas	Directo	Competencia	Sitios de infección radicular  Nutrición consumo de carbohidratos	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Producción de exudados de HMA que modifican el crecimiento de patógenos.</li> <li>- Modificaciones morfológicas y anatómicas en el sistema radicular.</li> <li>- Desarrollo de un entorno propicio para microorganismos antagonistas en la rizósfera.</li> <li>- Intercambio de nutrientes y agua con la planta (especialmente fósforo).</li> </ul>
	Indirecto	Favorecimiento de la planta	Inducción de resistencia sistémica  Estimulación del crecimiento	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Acumulación de especies reactivas de oxígeno, ácido salicílico, fitoalexinas y activación de fenilpropanoides.</li> <li>- Acumulación enzimas hidrolíticas: quitinasas y glucanasas</li> <li>- Mejor absorción de agua y nutrientes.</li> <li>- Mejor absorción de agua y nutrientes, mayor producción de biomasa, protección contra patógenos edáficos.</li> </ul>

Continuación cuadro 2

<i>Trichoderma</i> spp.	Directo	Micoparasitismo Competencia	Enzimas líticas Sitios de infección Secuestro de Hierro.	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Quitinasas, celulasas, hemicelulasas, proteasas, glucanasas</li> <li>- Desarrollo del micelio</li> <li>- Producción de Sideróforos, Procesos de oxidación, solubilización, quelatación y reducción.</li> </ul>
	Indirecto	Inhibición  Favorecimiento de la planta	Antibiosis  Inducción de resistencia sistémica  Estimulación del crecimiento	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Metabolitos secundarios volátiles y no volátiles como la Gliotoxina y el gliovirin.</li> <li>- Estimular la producción de Glucanasas, exoquitinasa y endoquitinasa en las planta</li> <li>- Estimular la producción de Glucanasas, exoquitinasa y endoquitinasa en las planta</li> <li>- Producción de metabolitos secundarios.</li> <li>- 6-n-pentyl-6H-pyran-2-one (6PP), gliotoxina, viridin, harzianopyridone, harzianidione, peptaibols, azaphilone; butenolide 1-hydroxy-3-methyl-anthraquinone, 1,8-dihydroxy-3-methyl-anthraquinone.</li> </ul>
<i>Pseudomonas</i> spp.	Directo	Competencia Inhibición	Intercambio de nutrientes	Producción de Sideróforos  Solubilización de nutrientes
	Indirecto	Inhibición  Favorecimiento de la planta	Antibiosis  Enzimas líticas Inducción de resistencia sistémica  Estimulación del crecimiento  Quorum sensing	<p>Producción de metabolitos antifúngicos ácido glucónico, 2,4-diacetilfloroglucinol (DAPG) fenazina-1-carboxílico ácido-PCA, fenazina-1-carboxamida (PCN)</p> <p>Celulasas, proteasas, quitinasas, glucanasas</p> <p>Ácido cianhídrico (HCN), la proteasa, el alginato, y las moléculas LP</p> <p>Producción de metabolitos secundarios, 3 - (1-hexenilo) - 5-metil-2 (5H)-furanona, N-mercapto-4-formyl-carbostyryl, lipodepsipeptides aerugine-cyclic.</p>

microorganismos, para el reconocimiento mutuo planta-microorganismos. La competencia de las plantas inter e intra-específica (tipo o especie vegetal), interviene en el desarrollo de las interacciones entre las plantas y los microorganismos, sean estas benéficas o patogénicas. Las condiciones ambientales, como la temperatura, la luminosidad, la precipitación y la humedad relativa modulan directamente el desarrollo de los microorganismos en el suelo y el crecimiento de las plantas, por ende, la interacción entre estos organismos también se ve afectada. De igual forma, la intervención antrópica en los sistemas de producción agrícola puede alterar,

la dinámica natural de las interacciones planta-microorganismo. Factores abióticos, como las características físicas y químicas del suelo, que se registran en la parte inferior de la figura, intervienen directamente en el desarrollo de cualquier tipo de interacción, entre las plantas y los microorganismos.

La interacción del consorcio AMF, *Trichoderma*, *Pseudomonas* con patógenos edáficos y las plantas, se plantea como tema central en la figura; las especies de los microorganismos mencionados compiten por ocupación de espacio y de nutrientes en la rizósfera de la planta; a su vez, la planta regu-

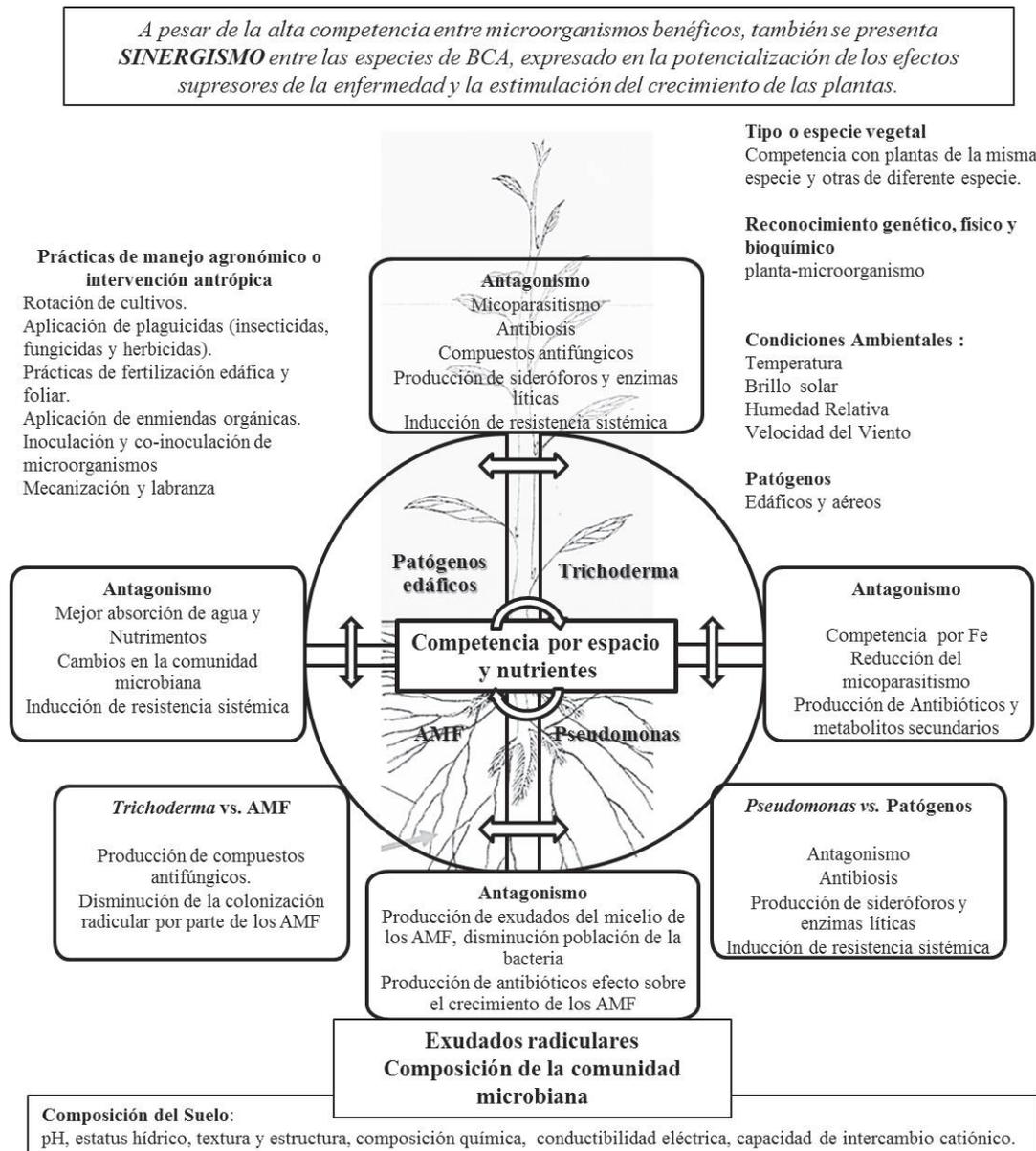


Figura 2. Factores bióticos y abióticos que modulan la interacción planta-suelo-microorganismos-ambiente e interacciones de los microorganismos del consorcio AMF, *Trichoderma*, *Pseudomonas*, con patógenos edáficos (Fuente: El autor).

la las comunidades microbianas, mediante la producción de exudados radicales y el reconocimiento genético y fisiológico con los microorganismos. Se muestra el efecto antagónico de cada una de las especies de BCA, sobre los patógenos edáficos. También se muestran los posibles efectos antagónicos entre las especies de BCA. Por último, en la parte superior de la figura, de forma concluyente, se menciona que, a pesar de presentarse una compleja interacción entre los BCA, se pueden utilizar en conjunto, aportando múltiples beneficios para el desarrollo de las especies vegetales.

#### Tipo, modo y mecanismos de acción comunes entre AMF, *Trichoderma* y *Pseudomonas*

En el cuadro 2, se condensan las estrategias funcionales, como tipo de antagonismo, modo y mecanismos de acción de algunos BCA, como: hongos formadores de micorrizas (Brimner & Boland, 2003; Selosse *et al.* 2004; Pozo & Azcón-Aguilar, 2007; Avis *et al.* 2008; Wehner *et al.* 2010), hongos antagonistas, como *Trichoderma* spp. (Melo *et al.* 1997; Brimner & Boland, 2003; Harman *et al.* 2004; Harman, 2006; García *et al.* 2006; Karthikeyan *et al.* 2006b; Olson & Benson, 2007; Verma *et al.* 2007; Bailey *et al.* 2008; Vinale *et al.* 2008b; Hoyos *et al.* 2008; Hoyos *et al.* 2009; Ruano & López, 2009; López-Mondéjar *et al.* 2011) y bacterias, como *Pseudomonas* spp. (Fakhouri *et al.* 2001; Lugtenberg *et al.* 2001; Spencer *et al.* 2003; Costa *et al.* 2006; Ji *et al.* 2006; Kaur *et al.* 2006; Bardas *et al.* 2009; Berry *et al.* 2010; Brown, 2010; Fgair & Eberl, 2010; Okubara *et al.* 2010).

**Conclusiones:** Los microorganismos analizados AMF, *Trichoderma* spp. y *Pseudomonas* spp. de forma individual y en mezclas, aportan beneficios importantes para las plantas, como la estimulación del crecimiento y la supresión de enfermedades, notando que la utilización de estos microorganismos es de amplio espectro, en cuanto a las especies vegetales, que abarca y los patógenos que regula.

La estimulación del crecimiento vegetal es posible con el uso de PGPM, bien sea por el aporte de agua y de nutrimentos, como en el caso de los AMF (aumento en la exploración del suelo, más allá de la zona de agotamiento de nutrientes y agua) o en la solubilización de compuestos orgánicos y la producción de metabolitos secundarios, que actúan de forma análoga a las fitohormonas, lo cual, influyen directamente en la disponibilidad de nutrientes y en la estimulación del crecimiento vegetal, como en el caso de *Pseudomonas* spp. y *Trichoderma* spp.

En cuanto a la utilización de estos microorganismos, como BCA, se puede indicar que manejan diversos tipos, modos y mecanismos de acción, relacionados con la competencia por espacio y por nutrientes; el parasitismo y la producción de compuestos antimicrobianos, que regulan y modifican la

composición de la comunidad microbiana del suelo, aportando así protección contra patógenos edáficos. De igual forma, la estimulación de los mecanismos de defensa natural de las plantas, mediante la inducción de resistencia por el uso de estos inoculantes, confieren tolerancia a patógenos aéreos.

Por otra parte, estos inoculantes, las enzimas, las hormonas y los metabolitos secundarios sintetizados por ellos, pueden ser utilizados como elicitores o efectores biológicos, contribuyendo, de esta manera, a una producción más limpia y sostenible en los sistemas agrícolas.

Queda en evidencia que se pueden presentar interacciones sinérgicas o antagónicas entre las diversas combinaciones de microorganismos benéficos, que pueden repercutir directamente en la funcionalidad de éstos, como BCA o PGPM y en la expresión del benéfico, en el crecimiento de las especies vegetales; sin embargo, este tipo de análisis es complejo y requiere de investigaciones más específicas.

Se observó que las interacciones de los microorganismos que conformaban este consorcio, de acuerdo al análisis, registraban interacciones antagónicas en cuanto a la eficiencia de las especies, entendida como la adaptación y proliferación de *Pseudomonas* spp. y *Trichoderma* spp. en la rizósfera de las plantas o de la colonización de las raíces de las plantas, por parte de los AMF, las cuales, en muchos casos, se vio reducida; no obstante, en cuanto a la efectividad, entendida como la expresión de los efectos benéficos en las plantas, en todos los casos, las mezclas de estos inoculantes contribuyen al control biológico de patógenos y a la estimulación del crecimiento vegetal.

Por último, es necesario realizar pruebas bioquímicas, fisiológicas, metabólicas, moleculares, celulares e, incluso, genéticas para poder dilucidar las posibles interacciones sinérgicas y antagónicas entre especies de microorganismos y su efecto en la funcionalidad expresada en los diferentes beneficios para las plantas.

## BIBLIOGRAFÍA

1. ADHILAKSHMI, M.; KARTHIKEYAN, M.; ALICE, D. 2008. Effect of combination of bio-agents and mineral nutrients for the management of alfalfa wilt pathogen *Fusarium oxysporum* f. sp. *medicaginis*. *Phytopath.* 99:274-281.
2. AKHTAR, M.S.; SIDDIQUI, Z.A. 2008. Biocontrol of a root-rot disease complex of chickpea by *Glomus intraradices*, *Rhizobium* sp. and *Pseudomonas straita*. *Crop Prot.* 27:410-417.

3. ALIYE, N.; FININSA, C.; HISKIAS, Y. 2008. Evaluation of rhizosphere bacterial antagonists for their potential to bioprotect potato (*Solanum tuberosum*) against bacterial wilt (*Ralstonia solanacearum*). *Biol. Control*. 47:282-288.
4. ALVES S., H.S.; DA SILVA R., R.; MACAGNAN, D.; DE ALMEIDA H.V, B.; BARACAT P., M.C.; MOUNTEERD, A. 2004. Rhizobacterial induction of systemic resistance in tomato plants: Non-specific protection and increase in enzyme activities. *Biol. Control*. 29:288-295.
5. ANJIAH, V.; THAKUR, R.P.; KOEDAM, N. 2006. Evaluation of bacteria and *Trichoderma* for biocontrol of pre-harvest seed infection by *Aspergillus flavus* in groundnut. *Biocontrol Sci. Techn.* 16(4):431-436.
6. AVIS, T.J.; GRAVEL, V.; ANTOUIN, H.; TWEDDELL, R.J. 2008. Multifaceted beneficial effects of rhizosphere microorganisms on plant health and productivity. *Soil Biology & Biochem.* 40:1733-1740.
7. BAE, Y.S.; KNUDSEN, G.R. 2005. Soil microbial biomass influence on growth and biocontrol efficacy of *Trichoderma harzianum*. *Biol. Control*. 32:236-242.
8. BAILEY, B.A.; BAE, H.; STREM, M.D.; CROZIER, J; THOMAS, S.E.; SAMUELS, G.J.; VINYARD, B.T; HOLMES, K.A. 2008. Antibiosis, mycoparasitism, and colonization success for endophytic *Trichoderma* isolates with biological control potential in *Theobroma cacao*. *Biol. Control*. 46:24-35.
9. BARDAS, G.A.; LAGOPODI, A.L.; KADOGLIDOU, K.; TZAVELLA-KLONARI, K. 2009. Biological control of three *Colletotrichum lindemuthianum* races using *Pseudomonas chlororaphis* PCL1391 and *Pseudomonas fluorescens* WCS365. *Biol. Control*. 49:139-145.
10. BEAUCHAMP, V.B.; WALZ, C.; SHAFROTH, P.B. 2009. Salinity tolerance and mycorrhizal responsiveness of native xeroriparian plants in semi-arid western USA. *Applied Soil Ecology*. 43:175-184.
11. BENNETT, A.J.; WHIPPS, J.M. 2008. Beneficial microorganism survival on seed, roots and in rhizosphere soil following application to seed during drum priming. *Biol. Control*. 44:349-361.
12. BERRY, C.; DILANTHA, F.W.G.; LOEWEN, P.C.; de KIEVIT, T.R. 2010. Lipopeptides are essential for *Pseudomonas* sp. DF41 biocontrol of *Sclerotinia sclerotiorum*. *Biol. Control*. 55:211-218.
13. BHARADWAJ, D.P.; LINDQUIST, P-O.; ALSTRÖMA, S. 2008. Arbuscular mycorrhizal fungal spore-associated bacteria affect mycorrhizal colonization, plant growth and potato pathogens. *Soil Biology & Biochemistry*. 40:2494-2501.
14. BRIMNER, T.A.; BOLAND, G.J. 2003. A review of the non-target effects of fungi used to biologically control plant diseases. *Agric. Ecosyst. Environ.* 100:3-16.
15. BROWN, D. 2010. A mathematical model of the Gac/Rsm quorum sensing network in *Pseudomonas fluorescens*. *Biosystems*. 101:200-212.
16. CARREÑO P., A.J.; BLANCO, V.J.O.; VILLEGAS, E.B. 2006. Selección de hongos biocontroladores de *Phytophthora cactorum*, agente causal de la pudrición radical y de corona en manzano. *Agron.* 14(1):89-96.
17. CHANDANIE, W.A.; KUBOTA, M.; HYAKUMACHI, M. 2009. Interactions between the arbuscular mycorrhizal fungus *Glomus mosseae* and plant growth-promoting fungi and their significance for enhancing plant growth and suppressing damping-off of cucumber (*Cucumis sativus* L.). *Applied Soil Ecology*. 41:336-341.
18. CHEUNG, K.C.; ZHANG, J.Y.; DENG, H.H.; OU, Y.K.; LEUNG, H.M.; WU, S.C.; WONG, M.H. 2008. Interaction of higher plant (jute), electrofused bacteria and mycorrhiza on anthracene biodegradation. *Bioresource Technology*. 99:2148-2155.
19. COSTA, R.; GOMES, N.C.M.; PEIXOTO, R.S.; RUMJANEK, N.; BERG, G.; MENDONÇA-HAGLER, L.C.S.; SMALLA, K. 2006. Diversity and antagonistic potential of *Pseudomonas* spp. associated to the rhizosphere of maize grown in a subtropical organic farm. *Soil Biology & Biochemistry*. 38:2434-2447.
20. DOUDS, D.D., Jr.; MILLNER, P.D. 1999. Biodiversity of arbuscular mycorrhizal fungi in agroecosystems. *Agric. Ecosyst. Environ.* 74:77-93.
21. FAKHOURI, W.; WALKER, F.; VOGLER, B.; ARMBRUSTER, W.; BUCHENAUER, H. 2001. Isolation and identification of N-mercapto-4-formylcarbostyryl, an antibiotic produced by *Pseudomonas fluorescens*. *Phytochem.* 58:1297-1303.

22. FGAIER, H.; EBERL, H.J. 2010. A competition model between *Pseudomonas fluorescens* and pathogens via iron chelation. *J. Theoret. Biol.* 263:566-578.
23. FGAIER, H.; FEHER, B.; MCKELLAR, R.C.; EBERL, H.J. 2008. Predictive modeling of siderophore production by *Pseudomonas fluorescens* under iron limitation. *J. Theoret. Biol.* 251:348-362.
24. FINLAY, R.D. 2004. Mycorrhizal fungi and their multifunctional roles. *Mycologist.* 18:91-96.
25. FRANKEN, P.; DONGES, K.; GRÜNWARD, U.; KOST, G.; REXER, K.H.; TAMASLOUKH, M.; WASCHKE, A.; ZEUSKE, D. 2007. Gene expression analysis of arbuscule development and functioning *Phytochem.* 68:68-74.
26. GARCÍA, R.; RIERA, R.; ZAMBRANO, C.; GUTIÉRREZ, L. 2006. Desarrollo de un fungicida biológico a base de una cepa del hongo *Trichoderma harzianum* proveniente de la región andina venezolana. *Fitosanidad.* 10(2):115-121.
27. GERA H., W.H.; COOK, R. 2005. An overview of arbuscular mycorrhizal fungi–nematode interactions. *Basic and Applied Ecology.* 6:489-503.
28. GOSLING, P.; HODGE, A.; GOODLASS, G.; BENDING, G.D. 2006. Arbuscular mycorrhizal fungi and organic farming *Agric. Ecosyst. Environ.* 113:17-35.
29. GRYNDLER, M.; VOSÁTKA, M.; HRŠELOVÁ, H.; CATSKÁ, V.; CHVÁTALOVA, I.; JANSÁ, J. 2002. Effect of dual inoculation with arbuscular mycorrhizal fungi and bacteria on growth and mineral nutrition of strawberry. *J. Plant Nutr.* 25:1342-1358.
30. GUO, J.H.; QI, H.Y.; GUO, Y.H.; GE, H.L.; GONG, L.Y.; ZHANG, L.X.; SUN, P.H. 2004. Biocontrol of tomato wilt by plant growth-promoting rhizobacteria. *Biol. Control.* 29:66-72.
31. HARMAN, G.E.; PETZOLDT, R.; COMIS, A.; CHEN, J. 2004. Interactions Between *Trichoderma harzianum* strain T22 and maize inbred line Mo17 and effects of these interactions on diseases caused by *Pythium ultimum* and *Colletotrichum graminicola*. *Phytopath.* 94:147-153.
32. HARMAN, G.E. 2006. Overview of mechanisms and uses of *Trichoderma* spp. *Phytopath.* 96:190-194.
33. HAUSE, B.; MROSK, C.; ISAYENKOV, S.; STRACK, D. 2007. Jasmonates in arbuscular mycorrhizal interactions. *Phytochem.* 68:101-110.
34. HAUSE, B.; SCHAARSCHMID, S. 2009. The role of jasmonates in mutualistic symbioses between plants and soil-born microorganisms. *Phytochem.* 70:1589-1599.
35. HOITINK, H.A.J.; MADDEN, L.V.; DORRANCE, A.E. 2006. Systemic resistance induced by *Trichoderma* spp.: Interactions between the host, the pathogen, the biocontrol agent, and soil organic matter quality. *Phytopath.* 96:186-189.
36. HOWELL, C.R.; PUCKHABER, L.S. 2005. A study of the characteristics of “P” and “Q” strains of *Trichoderma virens* to account for differences in biological control efficacy against cotton seedling diseases. *Biol. Control.* 33:217-222.
37. HOWELL, C.R. 2006. Understanding the mechanisms employed by *Trichoderma virens* to effect biological control of cotton diseases. *Phytopath.* 96(2):178-180.
38. HOYOS C., L.M.; CHAPARRO, P.; ABRAMSKY, M.; CHET, I.; ORDÓZ, S. 2008. Evaluación de aislamientos de *Trichoderma* spp. contra *Rhizoctonia solani* y *Sclerotium rolfsii* bajo condiciones in vitro y de invernadero. *Agron. Col.* 26(3):451-458.
39. HOYOS C., L.M.; ORDÓZ, S.; BISSETT, J. 2009. Growth stimulation in bean (*Phaseolus vulgaris* L.) by *Trichoderma*. *Biol. Control.* 51:409-416.
40. JETIYANON, K.; KLOEPPER, J.W. 2002. Mixtures of plant growth-promoting rhizobacteria for induction of systemic resistance against multiple plant diseases. *Biol. Control.* 29:34-42.
41. JI, P.; CAMPBELL, H.L.; KLOEPPER, J.W.; JONES, J.B.; SUSLOW, T.V.; WILSON, M. 2006. Integrated biological control of bacterial speck and spot of tomato under Weld conditions using foliar biological control agents and plant growth-promoting rhizobacteria. *Biol. Control.* 36:358-367.
42. KAPOOR, R.; SHARMA, D.; BHATNAGAR, A.K. 2008. Arbuscular mycorrhizae in micropropagation systems and their potential applications. *Scientia Horticulturae.* 116:227-239.
43. KARTHIKEYAN, V.; SANKARALINGAM, A.; NAKKEERAN, S. 2006a. Management of groundnut root rot

- with biocontrol agents and organic amendments. *Phytopathology and Plant Protection*. 39(3):215-223.
44. KARTHIKEYAN, V.; SANKARALINGAM, A.; NAKKEERAN, S. 2006b. Biological control of groundnut stem rot caused by *Sclerotium rolfsii* (Sacc.). *Phytopathology and Plant Protection*. 39(3):239-246.
  45. KARTHIKEYAN, M.; RADHIKA, K.; BHASKARAN, R.; MATHIYAZHAGAN, S.; SANDOSSKUMAR, R.; VELAZHAHAN, R.; ALICE, D. 2008. Biological control of onion leaf blight disease by bulb and foliar application of powder formulation of antagonist mixture. *Phytopathology and Plant Protection*. 41(6):407-417.
  46. KAUR, R.; MACLEOD, J.; FOLEY, W.; NAYUDU, M. 2006. Gluconic acid: An antifungal agent produced by *Pseudomonas* species in biological control of take-all. *Phytochem*. 67:595-604.
  47. LATHA, P.; ANAND, T.; RAGUPATHI, N.; PRAKASAM, V.; SAMIYAPPAN, R. 2009. Antimicrobial activity of plant extracts and induction of systemic resistance in tomato plants by mixtures of PGPR strains and Zimmu leaf extract against *Alternaria solani*. *Biol. Control*. 50:85-93.
  48. LEANDRO, L.F.S.; GÚZMAN, T.; FERGUSON, L.M.; FERNANDEZ, G.E.; LOUWS, F.J. 2007. Population dynamics of *Trichoderma* in fumigated and compost-amended soil and on strawberry roots. *Applied Soil Ecology*. 35:237-246.
  49. LIOUSSANNE, L.; PERREAULT, F.; JOLICOEUR, M.; ST-ARNAUD, M. 2010. The bacterial community of tomato rhizosphere is modified by inoculation with arbuscular mycorrhizal fungi but unaffected by soil enrichment with mycorrhizal root exudates or inoculation with *Phytophthora nicotianae*. *Soil Biology & Biochemistry*. 42:473-483.
  50. LÓPEZ-MONDÉJAR, R.; ROS, M.; PASCUAL, J.A. 2011. Mycoparasitism-related genes expression of *Trichoderma harzianum* isolates to evaluate their efficacy as biological control agent. *Biol. Control*. 56(1):59-66.
  51. LÜGTENBERG, B.J.J.; DEKKERS, L.; BLOEMBERG, G.V. 2001. Molecular determinants of rhizosphere colonization by *Pseudomonas*. *Ann. Rev. Phytopathol*. 39:461-90.
  52. MALUSA, E.; SAS-PASZT, L.; POPINSKA, W.; ZURAWICZ, E. 2007. The Effect of a Substrate Containing Arbuscular Mycorrhizal fungi and rhizosphere microorganisms (*Trichoderma*, *Bacillus*, *Pseudomonas* and *Streptomyces*) and foliar fertilization on growth response and rhizosphere pH of three strawberry cultivars. *Internal J. Fruit Sci*. 6(4):25-41.
  53. MARSCHNER, P.; TIMONEN, S. 2005. Interactions between plant species and mycorrhizal colonization on the bacterial community composition in the rhizosphere. *Applied Soil Ecology*. 28:23-36.
  54. MATIAS, S.R.; PAGANO, M.C.; MUZZI, F.C.; OLIVEIRA, C.A.; CARNEIRO, A.A.; HORTA, S.N.; SCOTTI, M.R. 2009. Effect of rhizobia, mycorrhizal fungi and phosphate-solubilizing microorganisms in the rhizosphere of native plants used to recover an iron ore area in Brazil. *European J. Soil Biology*. 45:259-266.
  55. MELO, I.S.; FACILL, J.L.; GRAEME-COOK, K.A. 1997. Relationship between in vitro cellulase production of uv-induced mutants of *Trichoderma harzianum* and their bean rhizosphere competence. *Mycol. Res*. 101(11):1389-1392.
  56. MOHANDAS, S.; MANJULA, R.; RAWAL, R.D.; LAKSHMIKANTHA, H.C.; CHAKRABORTY, S.; RAMACHANDRA, Y.L. 2010. Evaluation of arbuscular mycorrhiza and other biocontrol agents in managing *Fusarium oxysporum* f. sp. *Cubense* infection in banana cv. Neypoovan. *Biocontrol Sci. Techn*. 20(2):165-181.
  57. MOMMAERTS, V.; PLATTEAU, G.; BOULET, J.; STERK, G.; SMAGGHE, G. 2008. *Trichoderma*-based biological control agents are compatible with the pollinator *Bombus terrestris*: A laboratory study. *Biol. Control* 46: 463-466.
  58. NEUHAUSER, C.; FARGIONE, J.E. 2004. A mutualism-parasitism continuum model and its application to plant-mycorrhizae interactions. *Ecological Modelling*. 177:337-352.
  59. OKUBARA, P.A.; CALL, D.R.; KWAK, Y.S.; SKINNER, D.Z. 2010. Induction of defense gene homologues in wheat roots during interactions with *Pseudomonas fluorescens*. *Biol. Control*. 55:118-125.
  60. OLSON, H.A.; BENSON, D.M. 2007. Induced systemic resistance and the role of binucleate *Rhizoctonia* and *Trichoderma hamatum* 382 in biocontrol of *Botrytis* blight in geranium. *Biol. Control*. 42:233-241.

61. OYEKANMI, E.O.; COYNE, D.L.; FAGADE, O.E.; OSONUBI, O. 2007. Improving root-knot nematode management on two soybean genotypes through the application of *Bradyrhizobium japonicum*, *Trichoderma pseudokoningii* and *Glomus mosseae* in full factorial combinations. *Crop Prot.* 26:1006-1012.
62. POZO, M.A.; AZCÓN-AGUILAR, C. 2007. Unraveling mycorrhiza-induced resistance. *Plant Biology.* 10:393-398.
63. RADJACOMMARE, R.; VENKATESAN, S.; SAMIYAPPAN, R. 2010. Biological control of phytopathogenic fungi of vanilla through lytic action of *Trichoderma* species and *Pseudomonas fluorescens*. *Phytopathology and Plant Protection.* 43(1):1-17.
64. RAVNSKOV, S.; JENSEN, B.; KNUDSEN, I.M.B.; BØDKER, L.; JENSEN, D.F.; KARLINSKI, L.; LARSEN, J. 2006 Soil inoculation with the biocontrol agent *Clonostachys rosea* and the mycorrhizal fungus *Glomus intraradices* results in mutual inhibition, plant growth promotion and alteration of soil microbial communities. *Soil Biology & Biochemistry.* 38:3453-3462.
65. ROSAS, S.B.; VANZINI, G.; CARLIER, E.; PASLUOSTA, C.; PASTOR, N.; ROVERA, M. 2009. Root colonization and growth promotion of wheat and maize by *Pseudomonas aurantiaca* SR1. *Soil Biology & Biochemistry.* 41:1802-1806.
66. RUANO R., D.; LÓPEZ H, C.J. 2009. Evaluation of *Trichoderma* spp. as biocontrol agents against avocado white root rot. *Biol. Control.* 51: 66-71.
67. SELOSSE, M.A.; BAUDOIN, E.; VANDENKOORNHUYSE, P. 2004. Symbiotic microorganisms, a key for ecological success and protection of plants. *C. R. Biologies.* 327:639-648.
68. SHARMA, M.P.; ADHOLEYA, A. 2004. Effect of arbuscular mycorrhizal fungi and phosphorus fertilization on the post vitro growth and yield of micropropagated strawberry grown in a sandy loam soil. *Can. J. Bot.* 82:322-328.
69. SIDDIQUI, I.A.; SHAIKAT, S.S. 2003. Suppression of root-knot disease by *Pseudomonas fluorescens* CHA0 in tomato: Importance of bacterial secondary metabolite, 2,4-diacetylphloroglucinol. *Soil Biology & Biochemistry.* 35:1615-1623.
70. SIDDIQUI, Z.A.; AKHTAR, M.S. 2008. Synergistic effects of antagonistic fungi and a plant growth promoting rhizobacterium, an arbuscular mycorrhizal fungus, or composted cow manure on populations of *Meloidogyne incognita* and growth of tomato. *Biocontrol Sci. Techn.* 18(3):279-290.
71. SPENCER, M.; RYU, C.M.; YANG, K.Y.; KIM, Y.C.; KLOEPPER, J.W.; ANDERSON, A.J. 2003. Induced defence in tobacco by *Pseudomonas chlororaphis* strain O6 involves at least the ethylene pathway. *Physiological and Molecular Plant Pathology.* 63:27-34.
72. STANLEY, J.; CHANDRASEKARAN, S.; PREETHA, G.; KUTTALAM, S. 2010. Physical and biological compatibility of diafenthiuron with micro/macro nutrients fungicides and biocontrol agents used in cardamom. *Phytopathology and Plant Protection.* 43(14):1396-1406.
73. STURZ, A.V.; CHRISTIE, B.R. 2003. Beneficial microbial allelopathies in the root zone: The management of soil quality and plant disease with rhizobacteria. *Soil & Tillage Res.* 72:107-123.
74. VARGA, S.; KYTÖVIITA, M.M. 2010. Interrelationships between mycorrhizal symbiosis, soil pH and plant sex modify the performance of *Antennaria dioica*. *Acta Oecologica.* 36:291-298.
75. VÁZQUEZ, M.M.; CÉSAR, S.; AZCÓN, R.; BAREA, J.M. 2000. Interactions between arbuscular mycorrhizal fungi and other microbial inoculants (*Azospirillum*, *Pseudomonas*, *Trichoderma*) and their effects on microbial population and enzyme activities in the rhizosphere of maize plants. *Applied Soil Ecology.* 15:261-272.
76. VERMA, M.; BRAR, S.K.; TYAGI, R.D.; SURAMPALLI, R.Y.; VALÉRO, J.R. 2007. Antagonistic fungi, *Trichoderma* spp.: Panoply of biological control. *Biochemical Engineering J.* 37:1-20.
77. VINALE, F.; SIVASITHAMPARAM, K.; GHISALBERTI, E.L.; MARRA, R.; BARBETTI, M.J.; LI, H.; WOO, S.L.; LORITO, M. 2008a. A novel role for *Trichoderma* secondary metabolites in the interactions with plants. *Physiological and Molecular Plant Pathology.* 72:80-86.
78. VINALE, F.; SIVASITHAMPARAM, K.; GHISALBERTI, E.L.; MARRA, R.; WOO, S.L.; LORITO, M. 2008b. *Trichoderma*-plant-pathogen interactions. *Soil Biology & Biochemistry.* 40:1-10.

79. WALTERS, D.R. 2009. Are plants in the field already induced? Implications for practical disease control. *Crop Prot.* 28:459-465.
80. WEHNER, J.; ANTUNES, P.M.; POWELL, J.; MAZUKATOW, J.; RILLIG, M.C. 2010. Plant pathogen protection by arbuscular mycorrhizas: A role for fungal diversity? *Pedobiologia.* 53:197-201.
81. WELC, M.; RAVNSKOV, S.; KIELISZEWSKA-ROKICKA, B.; LARSEN, J. 2010. Suppression of other soil microorganisms by mycelium of arbuscular mycorrhizal fungi in root-free soil. *Soil Biology & Biochemistry.* 42:1534-1540.
82. WRIGHT, B.; ROWSE, H.R.; WHIPPS, J.M. 2003. Application of Beneficial Microorganisms to Seeds during Drum Priming. *Biocontrol Sci. Techn.* 13(6):599-614.
83. YASIR, M.; ASLAM, Z.; KIM, S.W.; LEE, S.W.; JEON, C.O.; CHUNG, Y.R. 2009. Bacterial community composition and chitinase gene diversity of vermicompost with antifungal activity. *Bioresource Technology.* 100:4396-4403.

Recibido: Junio 16 de 2011

Aceptado: Octubre 22 de 2011

# ANTAGONISMO DE *Pseudomonas fluorescens* Migula FRENTE A *Fusarium oxysporum* fsp. *pisi* Schtdl EN ARVEJA *Pisum sativum* L.

## ANTAGONISM OF *Pseudomonas fluorescens* Migula FACING *Fusarium oxysporum* fsp. *pisi* Schtdl ON PEA *Pisum sativum* L.

Germán Andrés Guerra<sup>1</sup>, Carlos Arturo Betancourth<sup>2</sup>, Claudia Elizabeth Salazar<sup>3</sup>

<sup>1</sup> I.A. Egresado Facultad de Ciencias Agrícolas, Universidad de Nariño, Ciudad Universitaria – Torobajo, bloque 2 piso 2, Pasto-Colombia, e-mail: germanandresguerra@gmail.com <sup>2</sup> I.A. M.Sc. Profesor Asociado. Grupo de Investigación Sanidad Vegetal Facultad de Ciencias Agrícolas, Universidad de Nariño, Ciudad Universitaria – Torobajo, bloque 2 piso 2, Pasto-Colombia, e-mail: cbet70@yahoo.com <sup>3</sup> I.A. M.Sc. Profesora Asistente. Grupo de Investigación Sanidad Vegetal, Facultad de Ciencias Agrícolas, Universidad de Nariño, Ciudad Universitaria – Torobajo, bloque 2 piso 2, Pasto-Colombia, e-mail: claudiasalazarg@yahoo.com

Rev. U.D.C.A Act. & Div. Cient. 14(2): 33 - 42, 2011

### RESUMEN

Uno de los principales problemas fitopatológicos que afecta el cultivo de arveja es el amarillamiento causado por el hongo *Fusarium oxysporum*, generando pérdidas considerables en las zonas productoras. Este trabajo, se llevó a cabo en el laboratorio e invernadero de la Universidad de Nariño, situado a una altura de 2.486msnm, a una temperatura promedio de 18°C, con el fin de evaluar el antagonismo de *P. fluorescens* frente a *F. oxysporum* en arveja L. El aislamiento de *F. oxysporum*, se realizó tomando tejidos afectados de raíces y de tallos de plantas de arveja, los cuales, se sembraron, se purificaron y se multiplicaron en PDA; la selección de la cepa, se efectuó con base en la prevalencia en todas las zonas y por la velocidad en su crecimiento, obteniendo la cepa FTR. El aislamiento de *P. fluorescens*, se practicó en raíces y en tallos de plantas sanas de arveja, que se encontraban en focos con amarillamiento, que se sembraron y se multiplicaron en agar Cetrimide, obteniendo las cepas PPC, PPO y PPL, después de haber realizado pruebas morfológicas y bioquímicas. Para evaluar el antagonismo, las pruebas duales se produjeron en medio Agar Nutriente, donde la cepa PPC presentó mayor control del crecimiento de *F. oxysporum* bajo condiciones *in vitro*. En las pruebas de invernadero, la incidencia de la enfermedad contrastó de un 90,31 a 6,55% con la bacteria, con respecto al testigo, mostrando la eficiencia antagonónica de la cepa PPC de *P. fluorescens* en el control de *F. oxysporum*, bajo condiciones controladas.

Palabras clave: Control Biológico, Rizobacteria, incidencia, amarillamiento.

### SUMMARY

The yellowing pea caused by *Fusarium oxysporum* is the most problem in the crop and its damage to bring economic losses. This research was carried out in the laboratory and greenhouse of the University of Nariño, located at 2486 masl to an average temperature of 13°C., in order to evaluate the antagonism of *P. fluorescent* facing *F. oxysporum* on pea *Pisum sativum* L. The isolation of *F. oxysporum* affected tissue was made from roots and stems of pea plants, which were multiplied and purified on PDA, strain selection was based on the prevalence in all zones and the speed in their growth, obtaining the strain FTR. The isolation of *P. fluorescent* was made from roots and stems of healthy pea plants that were in focus with yellowing, which were purified and multiplied in Selective Cetrimide Agar, obtaining strains PPC, PPO and PPL; after biochemical tests. The tests were made in dual in medium Nutrient Agar, in which the strain showed higher PPC antagonism to control the growth of *F. oxysporum* under *In vitro* conditions in the laboratory. In greenhouse tests the incidence rose from 90.31% to 6.55% with the bacteria compared with the control, showing the efficiency of the antagonistic strain *P. fluorescens* PPC in the control of *F. oxysporum* under controlled conditions.

Key words: Biological Control, Rhizobacteria, incidence, yellowing.

## INTRODUCCIÓN

En Colombia, la arveja (*Pisum sativum* L.) es cultivada en minifundios, localizados en zonas de ladera, en alturas comprendidas entre los 2.000 y 3.000msnm, con temperaturas promedios de 12 a 17°C (Tamayo, 2002). Existen variedades, como la Piquinegra, la Parda, la Pajarito, la Guatecana y Bogotana (CCI, 2000); sin embargo, el material Santa Isabel ocupa casi la totalidad del área sembrada, ya que satisface los requerimientos del mercado. La homogeneidad de la variedad representa una desventaja desde el punto de vista fitosanitario, haciendo que el manejo de enfermedades producidas por patógenos sea cada vez más costosa y difícil (FENALCE, 2002).

El amarillamiento causado por *Fusarium oxysporum* f. sp. *pisi* Schtdl en arveja, es una de las enfermedades prevalentes y dañinas, en cultivos intensivos. Esta enfermedad puede ocasionar pérdidas que varían del 30 al 50%, dependiendo de la incidencia, especialmente, en variedades susceptibles y bajo condiciones climáticas favorables para el desarrollo del patógeno. Los síntomas de la enfermedad inician con una clorosis, seguida por el achaparramiento de las plantas, que luego se marchitan y, finalmente, mueren (Tamayo, 2002; Buitrago *et al.* 2006; FENALCE, 2007). En el departamento de Nariño al no encontrarse variedades resistentes al amarillamiento, la rotación de cultivos y los sistemas de prevención, aun cuando sean técnicas seguras, tienen un valor limitado y, el control químico, se convierte en uno de los métodos más utilizados, pero no suficiente, ya que el hongo se encuentra ampliamente distribuido y es persistente en los suelos; en tiempos de lluvia, la incidencia incrementa a escalas epidémicas, con pérdidas considerables para los agricultores (Sañudo *et al.* 2001).

Las bacterias del género *Pseudomonas* tienen un gran potencial de degradación de compuestos aromáticos y xenobióticos, presentando la capacidad de colonizar el sistema radicular de plantas, formar biopelículas y ser manejable desde el punto de vista genético (Matthijs *et al.* 2007). *Pseudomonas fluorescens* Migula es un grupo de bacterias habitantes del suelo, estas son predominantemente numerosas en la microflora de la rizosfera de muchas plantas, siendo las primeras en colonizar las raíces jóvenes. Mucho de estos organismos suprimen enfermedades en las plantas, protegiendo las raíces y las semillas de la infección de los patógenos presentes en el suelo (Weller, 1988).

Según Lim *et al.* 1991; Loper & Buyer, 1991; Mukerji, 2004 y Matthijs *et al.* 2007, *P. fluorescens*, se ha registrado como antagonista de *F. oxysporum* en varias especies vegetales. En la actualidad, se están estudiando nuevas formas de manejo para el control de plagas y de enfermedades, puesto que los mercados internacionales tienen estrictas medidas para el ingreso de productos agrícolas con trazas de productos

químicos, como se establece en el Acuerdo de Medidas Sanitarias y Fitosanitarias (MSF) (OMC, 2008), por lo cual, se crea la necesidad de adoptar nuevas alternativas de manejo.

Con base en lo anteriormente expuesto, se planteó el presente trabajo de investigación, con el objetivo de aislar, desde la rizosfera de plantas de arveja, cepas de *P. fluorescens*, para evaluar antagonismo contra *F. oxysporum* f. sp. *pisi* bajo condiciones de laboratorio e invernadero, sobre las variedades de arveja ICA-CORPOICA Sindamanoy, Obonuco Andina, Obonuco, San Isidro y Santa Isabel.

## MATERIALES Y MÉTODOS

El presente trabajo, se realizó en el laboratorio de microbiología e invernadero de la Universidad de Nariño, en la sede de Torobajo (Pasto, Nariño), situado a una altura de 2.486msnm y a una temperatura promedio de 13°C.

Para el aislamiento de las *P. fluorescens*, así como de *F. oxysporum*, las muestras se recolectaron en lotes de arveja ubicados en los municipios de Potosí, de Ipiales, de Pupiales, de Yacuanquer, de Imués, de Tangua y los corregimientos de Mapachico, de Catambuco y de La Laguna, en el municipio de Pasto. Para el aislamiento y la purificación de *F. oxysporum*, se tomaron tejidos afectados de raíces y de tallos, se cortaron trozos de 5mm de lado, los cuales, se desinfectaron durante dos minutos en hipoclorito de sodio al 0,5%; luego, se hizo un enjuague durante un minuto en agua destilada. Posteriormente, se colocaron los cortes sobre papel filtro esterilizado, hasta que no se observó humedad. Para la siembra, se colocaron cuatro trozos en cajas de Petri, con medio de cultivo papa dextrosa agar (PDA), formando un cuadrado; luego, se sometieron a incubación a 25 y 28°C, observando diariamente la aparición de colonias (Ávila de Moreno, (2003). Para la identificación del hongo, se montaron placas con las estructuras del hongo agregando lactofenol, más azul de algodón, para su tinción. Se observaron al microscopio electrónico, tomando como criterios taxonómicos los propuestos por Alexopoulos *et al.* (1996), Booth (1977) y Barnett (1960).

La cepa de *F. oxysporum*, se seleccionó evaluando el crecimiento de las colonias durante quince días, en cajas Petri con PDA; las mediciones, se hicieron en milímetros día y se realizaron con un calibrador pie de rey, seleccionando, únicamente, la cepa con una mayor velocidad de crecimiento y prevalencia en las zonas en estudio, de acuerdo a su coloración, Alexopoulos *et al.* (1996); Sañudo *et al.* (2003).

Para el aislamiento de la bacteria antagonista, el material vegetal se seleccionó de plantas sanas, en donde se presentaban focos de plantas con los síntomas de amarillamiento, marchitamiento y muerte, en este caso, de las raíces de plantas; se cortaron en trozos de 5mm de

longitud y se depositó en Beakers de vidrio, con 300ml de agua estéril desionizada; después de agitar manualmente durante 15 minutos y de esta solución, se realizaron las siembras por dilución sobre placas de medio de Agar Cetrimide (MERCK 5284), que es selectivo para *P. fluorescens*. Para la purificación, se tomaron colonias individuales, que fueron llevadas a cajas Petri con Agar Cetrimide y Agar King B, para pruebas de fluorescencia (Pérez & Leguizamón, 1998).

La selección de las cepas de la bacteria, se procedió únicamente con las colonias que dieron positivo a pruebas de Fluorescencia, negativas a tinción de Gram y positivas para oxidasa (Matthijs *et al.* 2007).

El crecimiento dual, se efectuó en cajas Petri con Agar Nutriente, ya que en PDA el desarrollo de la bacteria es mínimo; se sembraron discos de 10mm de diámetro de la colonia pura de *F. oxysporum*, extraída previamente con sacabocados en los extremos de la caja Petri con PDA; la colonia pura de *P. fluorescens* fue extraída previamente de cajas con medio de cultivo Agar Cetrimide y sembrada tres días después en la misma caja Petri, a una distancia de 70mm de la colonia de *F. oxysporum*, usando, de igual forma, un disco de 10mm de diámetro de cada cepa (Sañudo *et al.* 2003)

La incubación, se efectuó a temperatura ambiente con un monitoreo diario durante 45 días; las mediciones del crecimiento del hongo, la bacteria y el halo de inhibición, se hicieron en mm y fueron realizadas con un calibrador pie de rey, siendo suspendidas hasta que el halo de inhibición de la bacteria logró crecer hasta el extremo opuesto del crecimiento micelial del hongo (Márquez *et al.* 2002).

Se elaboró un Diseño Irrestrictamente al Azar con tres tratamientos (Cepa PPC, PPO y PPL de *P. fluorescens*) y cinco repeticiones; los tratamientos correspondieron a las tres cepas bacterianas. Los resultados obtenidos, se analizaron mediante un Análisis de Varianza y una Prueba de Significancia de Tukey, en el programa estadístico Statgraphics Plus versión 5.1.

Las pruebas de invernadero, se efectuaron con cuatro variedades de arveja ICA CORPOICA Sindamanoy (ICS), Obonuco Andina (OA), Obonuco San Isidro (OSI), Santa Isabel (SI), empleando un Diseño irrestrictamente al Azar, con arreglo factorial 4x4, que correspondió a 16 tratamientos y cinco repeticiones; la unidad experimental estuvo compuesta por cinco plantas sembradas individualmente en bolsas de 1kg, con suelo previamente esterilizado.

La inoculación con *Pseudomonas* consistió en semillas de arveja, previamente inoculadas durante 24 horas, en una solución de 50c.c. de agua esterilizada y *P. fluorescens*, a una concentración de  $9 \times 10^6$  ufc/ml, de acuerdo a la escala

de McFarland's (Király *et al.* 1974); las semillas fueron inoculadas un día antes de la siembra (Pérez *et al.* 2000).

La inoculación con *Fusarium* consistió en el empleo de semillas de arveja sin contaminación bacteriana, inoculándose el sustrato siete días previos a la siembra con *F. oxysporum*, con una solución de 50c.c. de agua esterilizada y *F. oxysporum*, a una concentración de  $1 \times 10^6$  conidias por mililitro, obtenidas en la cámara de Neubauer, siendo aplicada esta solución por bolsa.

La inoculación con *F. oxysporum* + *P. fluorescens* consistió en sustrato inoculado siete días previos a la siembra con *F. oxysporum*, en una solución de 50c.c. de agua esterilizada a una concentración de  $1 \times 10^6$  conidias por mililitro, obtenidas en la cámara de Neubauer, siendo aplicada esta solución por bolsa, y semillas de arveja, previamente inoculadas 24 horas antes de la siembra, en una solución 50c.c. de agua esterilizada y *P. fluorescens*, con una concentración de  $9 \times 10^6$  ufc/ml, obtenidas en la cámara de Neubauer, las semillas fueron inoculadas un día antes de la siembra (Pérez *et al.* 2000).

Para el caso del testigo, no se realizó ningún tipo de inoculación en las semillas de arveja y el sustrato.

Las variables evaluadas fueron el porcentaje de emergencia, la cual, se evaluó durante los primeros siete días posteriores a la siembra, con la siguiente fórmula: Porcentaje de emergencia = (Número de plántulas emergidas / Número de semillas sembradas) x 100 y días a emergencia durante los primeros siete días posteriores a la siembra, contando el número de días que se tardó en emerger cada semilla en la bolsa. La incidencia de la enfermedad, se evaluó por la sintomatología de las plantas descrita por Tamayo (2002); esta evaluación se realizó durante sesenta días.

Los resultados obtenidos, se sometieron a un Análisis de Varianza y una Prueba de Significancia de Tukey al 0.05 en el programa estadístico Infostat Profesional 1.1. Además, para el análisis de varianza del porcentaje de emergencia y el de incidencia, se efectuó una transformación con la fórmula:  $\text{Arcosen } \sqrt{X}$ .

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En el muestreo realizado en las distintas zonas en estudio del Departamento de Nariño con problemas de amarillamiento en arveja, se obtuvieron tres tipos de cepas de *F. oxysporum* (Tabla 1), que se caracterizaron por presentar macroconidias curvadas y pluriseptadas, con una célula apical más o menos puntiaguda (Figura 1E y 1F); también se halló microconidias unicelulares, similares en ancho a los macroconidias, con una base redondeada o truncada; el micelio encontrado fue denso y algodonoso, correspondientes al género *Fusarium* (Alexopoulos *et al.* 1996; Booth, 1977; Barnett, 1960).

Tabla 1. Distribución y característica morfológica de las cepas de *Fusarium oxysporum*.

Zona		Color	Rojo	Rosado	Anaranjado
Zona centro	Catambuco		X		X
	Mapachico		X	X	
	La laguna		X		
Zona cerealista	Yacuanquer		X	X	
	Imues		X		X
	Tangua		X	X	X
Zona sur	Ipiales		X		
	Pupiales		X	X	
	Potosi		X		X

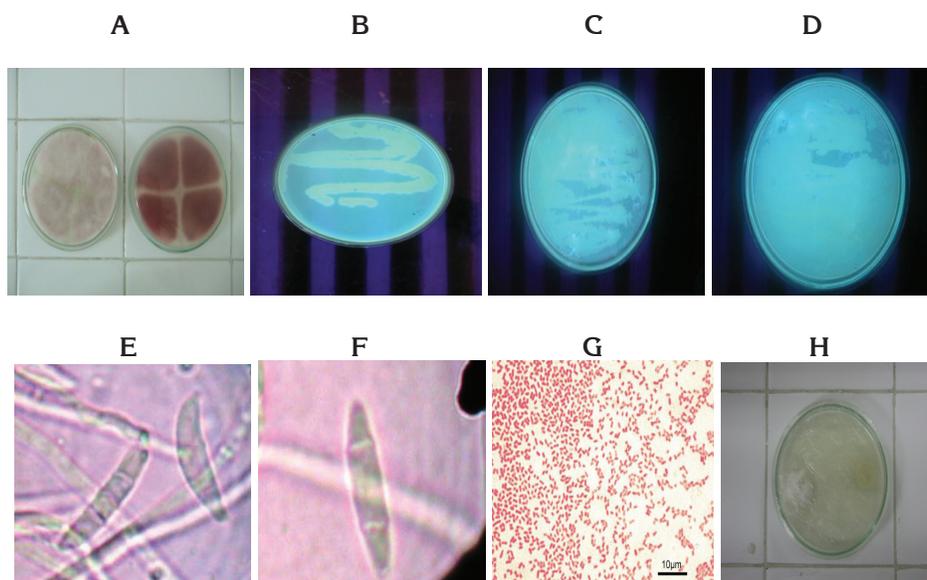


Figura 1. Aislamiento e identificación de cepas de *F. oxysporum* y *P. fluorescens*. A. Cepa de *F. oxysporum* FTR de coloración rojiza. B. Cepa de *P. fluorescens* PPC. C. Cepa de *P. fluorescens* PPO. D. Cepa de *P. fluorescens* PPL. E. Conidioforo. F. Acercamiento macroconidia septada en 3. G. *P. fluorescens* al microscopio (tinción de Gram). H. Antagonismo.

En la zona Centro, se percibieron cinco cepas; en la Cerealista, siete y en la zona Sur, cinco, siendo la más abundante la de coloración rojiza. Según Seifert (2001), las colonias de los distintos *F. oxysporum* que crecen moderada a profusamente, tienen diversos colores, especialmente, en el reverso de la colonia, excepto pardo oscuro o negro.

La selección de la cepa de *F. oxysporum*, se basó en la morfología o el crecimiento de las cepas, encontrándose que la cepa FTR, correspondiente al municipio de Tangua de color rojo (Figura 1A), tuvo un promedio de crecimiento 0,2mm/día de radio más que las otras cepas aisladas; esta, al igual que las otras de la misma coloracion, localizadas en todas las zonas en estudio, obtuvieron un promedio de crecimiento similar, por lo que fue indiferente la utilizacion de una cepa específica en particular de la misma coloracion.

Terminado el procedimiento de aislamiento y de purificación de la bacteria antagonista, se determinó que las cepas fueron Gram negativas (Figura 1G); al microscopio, se observaron bacilos cortos; además, fueron positivas para las pruebas de fluorescencia bajo luz ultra violeta y de oxidasa, según los resultados obtenidos en las pruebas correspondientes, por lo tanto, se afirma que corresponden a *P. fluorescens*, comparado con los parámetros establecidos por Matthijs *et al.* (2007) y Booth (1977).

Se seleccionaron tres cepas potenciales de *P. fluorescens*, que fueron las encontradas en el municipio de Pasto,

corregimiento de Catambuco: PPC (Figura 1B); en el municipio de Potosí: PPO (Figura 1C) y, una última, en el municipio de Pasto, corregimiento de La Laguna: PPL (Figura 1D).

La longitud del halo de inhibición de *P. fluorescens* frente a *F. oxysporum* después del punto de encuentro, se obtuvo diferencias estadísticas significativas, como se registran en el análisis de varianza (Tabla 2).

Al comparar los promedios de longitud de invasión en mm y utilizando prueba de Tukey, como se observa en la tabla 2,

Tabla 2. Análisis de varianza y comparación de los promedios de longitud del halo de inhibición *in vitro* dada en mm, de las tres cepas de *P. fluorescens*, utilizando prueba de Tukey 95%.

Fv	Gl	Sc	Cm	Fc	Ft
Tratamientos	2	414,12	207,06	8,79*	0,0045
Error	12	282,60	23,55		
Total	14	696,72			

\* Diferencias significativas ( $p \leq 0,05$ ).

Tratamiento	Cepa bacteriana	Medida	Agrupación tukey
1	Ppc	11,38	A
2	Ppo	0,45	B
3	Ppl	0,03	B

Tratamientos con letras distintas indican diferencias significativas.

se determinó que la longitud promedio del halo de inhibición fue de 11,38mm, en presencia de la cepa bacteriana PPC, presentó diferencias significativas en relación a los tratamientos anteriores, a diferencia de la longitud promedio reflejada en presencia de las cepas bacterianas PPO y PPL, con 0,4mm y 0,03mm, no presentaron diferencias estadísticas significativas.

En los días a emergencia, se determinó que las variedades ICA CORPOICA Sindamanoy, Obonuco Andina, Obonuco San Isidro y Santa Isabel, con el sistema de inoculación con *P. fluorescens* mostraron, en promedio, el menor número de días, con 4,7 días; además, el sistema de inoculación con *Fusarium+Pseudomonas*, con 5,1 días, reveló los menores días a emergencia respecto al testigo, con 5,65 días, debido a la previa inoculación con *P. fluorescens*, que actuó como agente promotor de desarrollo y de crecimiento, concordando con lo encontrado por García (2007).

Las bacterias promotoras del crecimiento vegetal (PGPR) como las *P. fluorescens*, se destacan por sus efectos positivos, tanto para las plantas como para los ecosistemas; este efecto se manifiesta a través de diferentes mecanismos de acción. Existe una cierta proporción, posiblemente, se deban a efectos antimicrobiales directos o indirectos, ya que muchos estudios arrojaron que las *P. fluorescens* inhiben el crecimiento y deterioran algunos microorganismos patógenos, entre ellos *F. oxysporum* (Cook, 1993).

Los días a emergencia con el sistema de inoculación con *Fusarium* con un promedio de 6,35 días fue el que más retraso tuvo con respecto al testigo y a los sistemas de inoculación de *P. fluorescens* y de *Fusarium+P. fluorescens*, debido a la presión ejercida por el patógeno, que impide el desarrollo en el proceso de germinación y de emergencia de la plántula (Agris, 2002).

El análisis de varianza (Tabla 3) del porcentaje de emergencia mostró diferencias estadísticas altamente significativas entre las inoculaciones, al igual que entre las variedades de arveja. En la interacción, se registraron diferencias estadísticas significativas, indicando que las inoculaciones y las variedades no actúan independientemente sobre el porcentaje de emergencia.

Al comparar los promedios de los porcentajes de emergencia y utilizando la prueba de Tukey (Tabla 3), se determinó que los más altos porcentajes los presentaron las variedades San Isidro, Santa Isabel, Andina y Sindamano, con el sistema de inoculación de *Pseudomonas*, con 99,50, 99 y 98,5% de emergencia, presentando promedios estadísticos similares entre sí, distinto estadísticamente al sistema de inoculación de las variedades San Isidro, Andina, Santa Isabel y Sindamano.

Tabla 3. Análisis de varianza y comparación de los promedios del porcentaje de emergencia, utilizando prueba de Tukey 95%.

FV	GL	SC	CM	FC	p-valor
	3	1,4307	0,4769	289,61**	<0,0001
VARIEDADES	3	0,0806	0,0269	16,31**	<0,0001
INOC. X VAR.	9	0,0413	0,0046	2,79*	0,0081
ERROR	64	0,1054	0,0016		
TOTAL	79	1,6579			

\*\* Diferencias altamente significativas ( $p \leq 0,0001$ ) ; \*: Diferencias significativas ( $p \leq 0,05$ ).

INOCULACIONES	VARIEDAD	MEDIA	AGRUPACIÓN TUKEY
<i>Pseudomonas</i>	SAN ISIDRO	99,50	A
<i>Pseudomonas</i>	SANTA ISABEL	99,00	A
<i>Pseudomonas</i>	ANDINA	98,50	AB
<i>Pseudomonas</i>	SINDAMANOY	98,50	AB
<i>Fusarium + Pseudomonas</i>	SAN ISIDRO	97,50	BC
<i>Fusarium + Pseudomonas</i>	ANDINA	97,00	BC
<i>Fusarium + Pseudomonas</i>	SANTA ISABEL	96,50	CD
<i>Fusarium + Pseudomonas</i>	SINDAMANOY	96,00	CD
Testigo	ANDINA	94,00	DE
Testigo	SAN ISIDRO	94,00	DE
Testigo	SINDAMANOY	93,50	DE
Testigo	SANTA ISABEL	93,50	DE
<i>Fusarium</i>	ANDINA	88,50	E
<i>Fusarium</i>	SAN ISIDRO	88,00	E
<i>Fusarium</i>	SANTA ISABEL	85,00	F
<i>Fusarium</i>	SINDAMANOY	84,50	F

Tratamientos con letras distintas indican diferencias significativas.

con el sistema de inoculación *Fusarium*+*Pseudomonas*; al igual que de las variedades Andina, San Isidro, Santa Isabel y Sindamanoy, con el sistema de inoculación *Fusarium* y de los testigos, con respecto a los testigos de estas variedades.

Las variedades San Isidro, Andina, Santa Isabel y Sindamanoy, con el sistema de inoculación *Fusarium*+*Pseudomonas*, con 97,5, 97, 96,5 y 96%, respectivamente, presentaron promedios similares entre sí y distintos a las variedades Andina, San Isidro, Santa Isabel y Sindamanoy, con el sistema de inoculación *Fusarium*, con 88,5, 88, 85 y 84,5% de emergencia que presentaron promedios similares entre sí y diferentes al nivel de significancia ( $p \leq 0,05$ ), con respecto a los Testigos Andina y San Isidro con 94% y de Sindamanoy y Santa Isabel, con 93,5% de emergencia.

Las variedades Andina, San Isidro, Santa Isabel y Sindamanoy con los sistemas de inoculación *Pseudomonas* y *Fusarium*+*Pseudomonas* tuvieron el más alto porcentaje

de emergencia con respecto al testigo y a las inoculaciones con *Fusarium*, debido a que las *P. fluorescens*, además de proteger las plantas al ataque de patógenos, también son rizobacterias promotoras de crecimiento, dando como resultado una reducción en la severidad de las distintas enfermedades fungosas que se puedan presentar y un aumento en el desarrollo de las plantas (Alström, 1991).

Las *P. fluorescens* poseen la propiedad de producir sustancias, cuyas principales ventajas son las de estimular la germinación de las semillas, acelerar el crecimiento de las plantas, especialmente en sus primeros estadios, inducir la iniciación radicular e incrementar la formación de raíces y pelos radiculares (Cornelis, 2008).

En cuanto al porcentaje de incidencia de la enfermedad, se hallaron diferencias estadísticas altamente significativas entre los tratamientos; entre las variedades de arveja, se encontraron diferencias estadísticas significativas.

Tabla 4. Análisis de varianza y comparación de los promedios del porcentaje de incidencia de la enfermedad utilizando prueba de Tukey 95%.

FV	GL	SC	CM	FC	p-valor
INOCULACIONES	3	50,06	16,69	1711,90**	<0,0001
VARIETADES	3	0,17	0,06	5,65*	0,0017
INOC. * VAR.	9	0,56	0,06	6,33**	<0,0001
ERROR	64	0,62	0,01		
TOTAL	79	51,40			

\*\* Diferencias Altamente significativas ( $p \leq 0,0001$ ); \*: Diferencias Significativas ( $p \leq 0,05$ ).

INOCULACIONES	VARIETADE	MEDIA	AGRUPACIÓN TUKEY
<i>Fusarium</i>	SAN ISIDRO	92,64	A
<i>Fusarium</i>	ANDINA	90,98	A
<i>Fusarium</i>	SANTA ISABEL	88,86	A
<i>Fusarium</i>	SINDAMANOY	88,76	A
<i>Fusarium</i> + <i>Pseudomonas</i>	SINDAMANOY	8,98	B
<i>Fusarium</i> + <i>Pseudomonas</i>	SANTA ISABEL	8,98	B
<i>Fusarium</i> + <i>Pseudomonas</i>	SAN ISIDRO	4,16	C
<i>Fusarium</i> + <i>Pseudomonas</i>	ANDINA	4,08	C
Testigo	SINDAMANOY	0,54	D
Testigo	ANDINA	0,52	D
Testigo	SAN ISIDRO	0,00	D
<i>Pseudomonas</i>	SAN ISIDRO	0,00	D
<i>Pseudomonas</i>	SANTA ISABEL	0,00	D
<i>Pseudomonas</i>	SINDAMANOY	0,00	D
<i>Pseudomonas</i>	ANDINA	0,00	D
Testigo	SANTA ISABEL	0,00	D

Tratamientos con letras distintas indican diferencias significativas.

En la interacción, se percibieron diferencias estadísticas altamente significativas, indicando que las inoculaciones y las variedades no actúan independientemente sobre el porcentaje de incidencia, como se registra en el análisis de varianza (Tabla 4).

Al comparar los promedios del porcentaje de incidencia y utilizando la prueba de Tukey, como se observa en la tabla 4, se determinó que el más alto porcentaje de incidencia se presentó en las variedades San Isidro, Andina, Santa Isabel y Sindamanoy, con el sistema de inoculación con *Fusarium* 92,64, 90,98, 88,86 y 88,76% de incidencia, presentando promedios estadísticos similares entre sí.

Distinto, estadísticamente de las variedades Sindamanoy, Santa Isabel, San Isidro y Andina, con un sistema de inoculación con *Fusarium+Pseudomonas*; al igual que San Isidro, Santa Isabel, Sindamanoy y Andina, con un sistema de inoculación con *Pseudomonas* y de los testigos Sindamanoy, Andina, San Isidro y Santa Isabel.

Las variedades San Isidro, Andina, Sindamanoy y Santa Isabel, con un sistema de inoculación con *Fusarium+Pseudomonas*, con 4,16, 4,08 y 8,98% de incidencia que presentaron promedios similares entre sí y diferentes al nivel de significancia ( $p \leq 0,05$ ), con respecto a los Testigos con las variedades San Isidro y Santa Isabel, con 0% y de las variedades Sindamanoy y Andina, con 0,54 y 0,52% de incidencia, al igual que con el sistema de inoculación con *Pseudomonas*, con las variedades San Isidro, Santa Isabel, Sindamanoy y Andina, con 0% de incidencia.

En las variedades ICA CORPOICA Sindamanoy, Obonuco Andina, Obonuco San Isidro y Santa Isabel, frente a las inoculaciones con *F. oxysporum*, con un promedio de 90,31% de incidencia, se presentó un alto porcentaje de incidencia de la enfermedad con respecto a los testigos, de ahí que se confirma lo reportado por Campuzano *et al.* (1992; 2001), Checa (1995) y Sañudo *et al.* (1993), quienes afirman que estos genotipos son altamente susceptibles a la enfermedad.

Las variedades de arveja inoculadas con *F. oxysporum* presentaron lesiones localizadas, principalmente, en la base del tallo y en la parte superior de la raíz; las lesiones fueron alargadas, pardo rojizas, ligeramente hundidas (Buitrago *et al.* 2006; Sañudo *et al.* 2001); estas lesiones se pueden extender a las raíces secundarias y la parte inferior del sistema radical.

La lesión del tallo es primariamente cortical, pero en algunos casos, se puede extender una decoloración rojiza del sistema vascular, hasta una corta distancia sobre la lesión cortical. Este último síntoma consigue incluir a confusión con el marchitamiento, pero, en general, el limitado alcance de la

decoloración vascular es suficiente para distinguir el ataque del patógeno. En las partes epigeas, los síntomas consisten en un precario desarrollo; en los casos extremos, la planta se marchita y muere (Martínez *et al.* 2004).

Las inoculaciones con *P. fluorescens* disminuyen la incidencia de la enfermedad, lo cual, se debe a la baja presión ejercida por el patógeno (Mukerji, 2004) y a la producción de uno o más metabolitos, como el 2- 4 diacetyl-phloroglucinol, incluyendo sideróforos, antibióticos, cianuro y enzimas líticas e, incluso, las *P. fluorescens* pueden inducir resistencia para ciertos patógenos en las plantas; esta inducción activa los mecanismos de defensa de la plantas, ya sea como barreras físicas o químicas, dependiendo del hospedante y de la efectividad de la colonización de las raíces por *Pseudomonas*. Se piensa que las pyoverdinas producidas por *P. fluorescens* facilitan el control biológico, apropiándose del hierro que está presente en la rizosfera, ayudando a la limitación severa de hierro en el ambiente en las raíces de la planta, por consiguiente, se observa el descenso de otros organismos y por último, la supresión de distintos microorganismos (Buyer & Leong, 1986).

El papel de las enzimas micolíticas, como la quitina, producidas por las *P. fluorescens*, en la supresión de patógenos es de gran importancia en su control de patógenos. Si las plantas no contienen quitina en las paredes de las células, se puede hacer el uso de protectores de plantas con quitina, que también lo tienen los hongos patógenos. Microscopias electrónicas han revelado la interacción de *F. oxysporum* y *P. fluorescens*, y la degradación del micelio de *F. oxysporum*, puesto que las enzimas líticas producidas de manera extracelular inhiben el micelio y el crecimiento del conidióforo, en vez de la germinación de la spora. La micólisis, por lo tanto, se define como la pérdida del protoplasma en la estructura del hongo y la disolución enzimática de la célula (Lim *et al.* 1991).

*P. fluorescens* produce antibiótico, siendo éste altamente inhibitorio para *F. oxysporum*; se mostraron que los mecanismos de supresión en contra de los hongos puede involucrar enzimas líticas en vez de antibióticos. *P. stutzeri* YPL-1 produce, de manera extracelular, quitinasa y laminariánasa, cuando crece el micelio de *F. oxysporum* fsp. *solani*, produciéndose polímeros de quitina y de laminarina (Lim *et al.* 1991).

Los antibióticos producidos por algunas *P. fluorescens* son de gran importancia, destacándolos en la supresión de enfermedades en las plantas (Mukerji, 2004). La resistencia sistémica inducida por *P. fluorescens* inducen a un cambio sostenido en la planta, incrementando la tolerancia a la infección de patógenos, este fenómeno promueve la resistencia inducida, activando las defensas de las plantas (Uknes *et al.* 1993).

Las cepas de *P. fluorencens* fueron eficientes para el control de *F. oxysporum* en condiciones controladas, pero existe la necesidad de ser probada en condiciones de campo, para evaluar su eficiencia en el control del patógeno. Igualmente, se detectó que la cepa de *P. fluorencens* PPC disminuyó la incidencia de la enfermedad de un 90,31% a 6,55% con relación al testigo en presencia de la bacteria, mostrando gran eficiencia en el control de *F. oxysporum*, en condiciones de invernadero.

**Agradecimientos.** Los autores agradecen la realización de este estudio a la Universidad de Nariño, Facultad de Ciencias Agrícolas, Programa de Ingeniería Agronómica, Grupo de Investigación de Sanidad Vegetal. **Conflictos de intereses:** El manuscrito fue preparado y revisado con la participación de todos los autores, quienes declaramos que no existe ningún conflicto de intereses que ponga en riesgo la validez de los resultados presentados. **Financiación:** Este estudio fue financiado por la Universidad de Nariño.

## BIBLIOGRAFÍA

- AGRIOS, G. 2002. Fitopatología. Editorial Limusa, México. 835p.
- ÁVILA DE MORENO, C. 2003. Manual de laboratorio de fitopatología. Tunja: UPTC. p.17-19.
- ALEXOPOULOS, C.J.; MIMS, C.W.; BLACKWELL, M. 1996. Introductory mycology. 4a ed. Editorial Wile & Sons, N.Y. 578p.
- ALSTRÖM, S. 1991. Induction of disease resistance in common bean susceptible to halo blight bacterial pathogen after seed bacterization with rhizosphere pseudomonads. J. Gral Appl. Environm. Microbiol. 37:495-501.
- BARNETT, H.L. 1960. Illustrated genera of imperfect fungi. Burgess Publishing Co., Minneapolis. 215p.
- BOOTH, C. 1977. The Genus *Fusarium*. Editorial CMI. Kew, Surrey. p.19-31.
- BUITRAGO E., J.Y.; DUARTE P., C.J.; SARMIENTO, A. 2006. El cultivo de la arveja en Colombia. Federación Nacional de Cultivadores de Cereales y Leguminosas -FENALCE- y Fondo Nacional Cerealista. Ed. Produmedios. Bogotá. Colombia. 83p.
- BUYER, J.S.; LEONG J. 1986. Iron transport-mediated antagonism between plant growth-promoting and plant deleterious *Pseudomonas* strains. J. Biol. Chem. 261:791-794.
- CHECA CORAL, O. 1995. Sindamanoy: variedad mejorada de arveja para clima frío. CORPOICA. 8p.
- CAMPUZANO D., L.F.; YÉPEZ CHAMORRO, B.; BENAVIDES PAZMIÑO, J.; BOLAÑOS, M.A.; ARCILA GONZÁLEZ, B.; LÓPEZ DE B., C.M.; CEPEDA BRAVO, G. 1992. Obonuco Andina: nueva variedad mejorada de arveja para la zona de economía campesina del sur de Nariño. ICA. Bol. Div. N° 9. 8p.
- CAMPUZANO D., L.F.; YÉPEZ CHAMORRO, B.; BENAVIDES PAZMIÑO, J.; BOLAÑOS, M.A.; ARCILA GONZÁLEZ, B.; LÓPEZ DE B., C.M. 2001. Obonuco San Isidro: nueva variedad mejorada de arveja para la zona de reconversión de trigo en el departamento de Nariño. CORPOICA. Bol. Div. N° 8. 8p.
- COOK, R.J. 1993. Making greater use of introduced microorganisms for biological control of plant pathogens. Ann. Rev. Phytopath. 31:53-80.
- CORNELIS, P. 2008. *Pseudomonas*: Genomics and Molecular Biology. Ed. Pierre Cornelis Vrije Universiteit Brussel, Belgium. p.14-25.
- CORPORACIÓN COLOMBIA INTERNACIONAL CCI. 2000. Manual del exportador de frutas, hortalizas y tubérculos en Colombia. Disponible desde Internet en: [http://www.cci.org.co/manual%20Exportador/desempeno\\_prod/princ\\_prod\\_mapas/princ\\_prod11.htm](http://www.cci.org.co/manual%20Exportador/desempeno_prod/princ_prod_mapas/princ_prod11.htm) (con acceso 15/11/10).
- FEDERACIÓN NACIONAL DE CULTIVADORES DE CEREALES Y LEGUMINOSAS FENALCE. 2007. Arveja. Disponible desde Internet en: [http://www.fenalce.net/pagina.php?p\\_a=52](http://www.fenalce.net/pagina.php?p_a=52) (con acceso 04/11/10).
- FEDERACIÓN NACIONAL DE CULTIVADORES DE CEREALES Y LEGUMINOSAS FENALCE. 2002. Conocimiento Técnico: Amarillamiento en arveja. Disponible desde Internet en: [http://www.fenalceorg.c\\_Cuotas.htm](http://www.fenalceorg.c_Cuotas.htm) (con acceso 20/12/10).
- GARCÍA, R. 2007. Efecto de la inoculación con rizobacterias promotoras del crecimiento de las plantas (PGPR) sobre el crecimiento de trigo y la eficiencia en el uso de fertilizante. Buenos Aires. Disponible desde Internet <http://www.slideshare.net/soilteacher/garcia-efecto-de-la-inoculacion-con-rizobacterias> (con acceso 20/03/10).

18. KIRÁLY, Z.; KLEMENT, Z.; SOLYMOSY, F.; VORAS, J. 1974. *Methods in Plant Pathology*. Elsevier Scientific Publishing Company. NewYork, USA. p.30-40.
19. LIM, H.S.; KIM, Y.S.; KIM, S.D. 1991. *Pseudomonas stutzeri* YLP-1 genetic transformation and antifungal mechanism against *Fusarium solani*, an agent of plant root rot. *Appl. Environm. Microbiol.* 57:510-516.
20. LOPER, J.E.; BUYER, J.S. 1991. Siderophores in microbial interations on plants surfaces. *Molecular Plant-Microbe Interactions.* 4:5-13.
21. MÁRQUEZ, M.; MARTÍNEZ, M.; FRANCO, M. 2002. Aislamiento de *Trichoderma* sp. y actinomycetes a partir de suelos de clavel (*Dianthus caryophyllus*) y evaluación de su capacidad antagonica in vitro sobre *Fusarium oxysporum* f. sp. *dianthi*. *Agron. Colomb.* 19(1-2):81-87.
22. MARTÍNEZ GARNICA, M.; HERNÁNDEZ DELGADO, S.; RAMÍRES PADILLA, J.; MAYEK PÉREZ, N. 2004. Diversidad genética y patogénica de *Fusarium*. *Rev. Mexicana Fitopat.* 22(3):321-927.
23. MATTHIJS, S.; TEHRANI, K.A.; LAUS, G.; JACKSON, R.W.; COOPER, R.M.; CORNELIS, P. 2007. *Pseudomonas thioquinolobactin*, a *Pseudomonas siderophore* with antifungal and anti-Pythium activity. *Environ. Microbiol.* 9(2):425-434.
24. MUKERJI, K.G. 2004. *Fruits and vegetables*. Dheli: Klower Academic Publisher. p.455-460.
25. ORGANIZACIÓN MUNDIAL DEL COMERCIO OMC. 2008. *Medidas sanitarias y fitosanitarias*. Disponible desde Internet en [http://www.wto.org/spanish/tratop\\_s/sps\\_s/sps\\_s.htm](http://www.wto.org/spanish/tratop_s/sps_s/sps_s.htm) (con acceso 29/06/10).
26. PÉREZ, C.; DE LA FUENTE, L.; ARIAS, A.; ALTIERI, N. 2000. Uso de *Pseudomonas fluorescens* nativas para el control de enfermedades de implantación en *Lotus corniculatus* L. *Agrociencia.* 4(1):41-47.
27. PÉREZ N., J.C.; LEGUIZAMON C., J.E. 1998. Interacciones entre micorrizas nativas, *Pseudomonas* fluorescentes y Calcio en el manejo de *Fusarium* spp. en espárragos. *Cenicafé (Colombia)* 49(3):211-223.
28. SAÑUDO SOTELO, B.; CHECA CORAL, O.; ARTEAGA MENESES, G. 1993. Manejo agronómico de leguminosas en zonas cerealistas. Ed. Universidad de Nariño. Colombia: Pasto. p.49-60.
29. SAÑUDO SOTELO, B.; CHECA CORAL, O.; ARTEAGA MENESES, G. 2001. Perspectivas para el desarrollo agrícola de la zona triguera de Nariño. Ed. Universidad de Nariño. Colombia: Pasto. 214p.
30. SAÑUDO SOTELO, B.; ARTEAGA, M.; VALLEJO, W.; FIGUEROA, R.; BURBANO, E. 2003. *Fundamentos de Micología agrícola*. Ed. Universidad de Nariño. Colombia: Pasto. 201p.
31. SEIFERT, K.F. 2001. *Fusarium* and anamorph generic concepts. *Agriculture and Agri-Food*. En: Summerell, B.A.; Leslie, J.F.; Backhouse, D.; Bryden, W.L.; Burgess L.W. (Eds) *Fusarium*. APS Press St. Paul, Minnesota, Canada. p.70-79.
32. TAMAYO M., P.J. 2002. *Enfermedades del cultivo de la arveja en Colombia: Guía de reconocimiento y control*. Boletín técnico 14. Corpoica Regional 4. Colombia. 49p.
33. UKNES, S.; WINTER, A.M.; DELANEY, T.; VERNOOIJ, B.; MORSE, A.; FRIEDRICH, L.; NYE, G.; POTTER, S.; WARD, E.; RYALS, J. 1993. Biological induction of systemic acquired resistance in *Arabidopsis*. *Mol. Plant-Microbe Interactions.* 6:692-698.
34. WELLER, D.M. 1988. Biological control of soil – borne plant pathogens in the rhizosphere with bacteria. *Ann. Rev. Phytopath.* 26:379-469.

Recibido: Enero 20 de 2011

Aceptado: Octubre 10 de 2011

# CRECIMIENTO Y EFICIENCIA FOTOQUÍMICA DEL FOTOSISTEMA II EN PLANTAS DE FRESA (*Fragaria* sp.) AFECTADAS POR LA CALIDAD DE LA LUZ: IMPLICACIONES AGRONÓMICAS

## GROWTH AND PHOTOCHEMICAL EFFICIENCY OF PHOTOSYSTEM II IN STRAWBERRY PLANTS (*Fragaria* sp.) AFFECTED BY THE LIGHT QUALITY: AGRONOMIC IMPLICATIONS

Fánor Casierra-Posada<sup>1</sup>, Jaime E. Peña-Olmos<sup>1</sup>, Christian Ulrichs<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia (UPTC), Facultad de Ciencias Agropecuarias, Grupo de Investigación Ecofisiología Vegetal. Avenida Central del Norte, Tunja, Colombia. Autor para correspondencia: fanor.casierra@uptc.edu.co <sup>2</sup> Humboldt-Universität zu Berlin, Faculty for Agriculture and Horticulture, Division Urban Plant Ecophysiology, Lentzeallee 55/57, 14195 Berlin, Germany.

Rev. U.D.C.A Act. & Div. Cient. 14(2): 43 - 53, 2011

### RESUMEN

Fotomorfogénesis es cualquier cambio de forma o de función en un organismo, que sucede en respuesta a las modificaciones en la luz ambiental. La calidad de la luz, se capta mediante receptores específicos para las diferentes longitudes de onda. En un ensayo factorial, se evaluó la influencia de la calidad de la luz sobre el crecimiento y la eficiencia fotoquímica del fotosistema II (PSII) en plantas de fresa (*Fragaria* sp., cv. Chandler), bajo invernadero, en Tunja, Colombia. Las plantas crecieron bajo diferente calidad de luz (amarilla, verde, azul, roja, transparente y el control sin cobertura), proporcionada por películas filtro de polipropileno. Se realizaron determinaciones de fluorescencia mínima ( $F_0$ ), máxima ( $F_m$ ), variable ( $F_v$ ), terminal ( $F_t$ ) y la eficiencia fotoquímica máxima ( $F_v/F_m$ ), en hojas adaptadas a la oscuridad, 32 semanas luego del trasplante. En relación con el crecimiento, las plantas control registraron los valores más altos de materia seca por planta y de peso específico de las hojas. Las plantas bajo el filtro rojo desarrollaron la mayor área foliar, mientras que el filtro verde redujo el crecimiento. Las películas de color modificaron el patrón de asignación de materia seca en los órganos de las plantas, especialmente, el filtro de color verde. La luz filtrada afectó todos los parámetros de la fluorescencia de la clorofila. En relación con las plantas control  $F_v$ ,  $F_m$  y  $F_t$  fueron mayores en las plantas que crecieron bajo todas las coberturas. Mientras que  $F_0$  fue

mayor bajo las coberturas amarilla y transparente,  $F_v/F_m$  fue menor bajo esas películas filtro. Los resultados se discuten en relación con sus posibles implicaciones sobre prácticas agronómicas apropiadas.

Palabras clave: Fotomorfogénesis, material seca, partición de biomasa, luz coloreada,  $F_v/F_m$ , fluorescencia mínima, fluorescencia máxima.

### SUMMARY

Photomorphogenesis is any change in form or function of an organism occurring in response to changes in the light environment. Light quality is mainly sensed by the presence of different light receptors specific for different wavelengths. The influence of light quality on the growth and photochemical efficiency of photosystem II (PSII) in strawberry plants (*Fragaria* sp., cv. Chandler) was examined in a factorial set up, under greenhouse in Tunja / Colombia. Plants grew under diverse light qualities (yellow, green, blue, red, transparent, and control without colored cover) provided by polypropylene filter films. Determinations of minimum ( $F_0$ ), maximum ( $F_m$ ), variable ( $F_v$ ), and terminal ( $F_t$ ) fluorescence and maximum photochemical efficiency ( $F_v/F_m$ ) of dark-adapted leaves were done 32 weeks after the transplant. Related to growth,

control plants recorded highest dry matter and specific leaf weight. Plants growing under the red filter developed highest leaf area. The green film reduced the growth. The color films changed the dry matter partitioning patterns in the plants organs, specially the green filter. Filtered light affected the chlorophyll fluorescence variables, related to control plants. Regards to control plants,  $F_v$ ,  $F_m$  and  $F_t$  were higher in plants growing under all covers. While  $F_0$  was higher under the transparent and yellow films,  $F_v/F_m$  was lower under these covers. The results were discussed in relation to possible implications for appropriate agronomic practices.

Key words: Photomorphogenesis, dry matter, biomass partitioning, colored light,  $F_v/F_m$ , minimal fluorescence, maximal fluorescence.

## INTRODUCCIÓN

Los vegetales poseen mecanismos fotoselectivos sofisticados para capturar la energía lumínica, necesaria para la fotosíntesis (Jiao *et al.* 2007). La intensidad y la calidad de la luz son factores determinantes en el crecimiento y desarrollo de los vegetales (Fukuda *et al.* 2008). Los cambios en la calidad de la luz afectan considerablemente muchos parámetros anatómicos, fisiológicos, morfológicos y bioquímicos en las plantas (Haliapas *et al.* 2008).

La fotomorfogénesis involucra tres grupos importantes de fotorreceptores transductores de información: los fitocromos, los receptores de la luz azul y los fotorreceptores de luz UV-B (Jiao *et al.* 2007), aunque también se ha reportado la presencia de un compuesto a base de zeaxantina como receptor de luz verde (Folta & Maruhnich, 2007). El rango máximo de absorción de la forma Pr del fitocromo asemeja el de las clorofilas (rojo); sin embargo, la forma Pfr absorbe a longitudes de onda más largas (rojo lejano) (Mathews, 2010). Junto con los fitocromos, se encuentran otros receptores de la luz azul, como los criptocromos y las fototropinas (Strasser *et al.* 2010). Los fotorreceptores UV-B están también implicados en algunas respuestas fotomorfogénicas controladas por las fototropinas. En la última década, se caracterizó un fotorreceptor de luz azul denominado 'zeitlupe' (Imaizumi *et al.* 2003).

El efecto de la calidad de la luz ha sido motivo de investigación, con el objeto de sacar provecho del efecto fotomorfogénico inducido en los vegetales por las diferentes longitudes de onda de la luz incidente (Shahak *et al.* 2008; Casierra-Posada & Rojas, 2009). En las últimas tres décadas, el efecto de la calidad de luz sobre algunas hortalizas y frutales se ha estudiado con la utilización de láminas coloreadas sobre el suelo (mulch plástico), las cuales, reflejan la luz de

diferentes longitudes de onda, que cambian el microclima alrededor de las plantas (Decoteau, 2008). Algunas características de las plantas, como la tasa de crecimiento, el desarrollo de órganos vegetativos y reproductivos, la biomasa total y la distribución de foto-asimilados, fueron afectadas por calidad de la luz, particularmente, por la relación r/fr (red/far red) (Bradburne *et al.* 1989). En estudios de campo, bajo riego, la calidad de frutas de fresa en los cultivares Chandler y Sweet Charlie, en términos de concentración de compuestos aromáticos, fue superior cuando el suelo se cubrió con plástico rojo, en comparación con plástico de color negro (Loughrin & Kasperbauer, 2002). Estos autores concluyeron que las bandas de luz en los rangos rojo y rojo lejano reflejadas desde el plástico rojo, posiblemente, actuaron a través de los sistemas de fitocromos, modificando la expresión de algunos genes. En consecuencia, aumentaron las concentraciones de compuestos aromáticos en frutos de fresa.

Miranda & Williams (2007) evaluaron la eficiencia fotoquímica del fotosistema II (PSII) *in vitro* en hojas de fresa y encontraron un incremento de este parámetro, en un rango de 0,64, bajo luz blanca, a 0,80, bajo luz amarilla. Además, las hojas desarrolladas bajo luz azul fueron similares al control con luz blanca en muchos parámetros relacionados con la fluorescencia de la clorofila, con excepción del nivel inicial de la fluorescencia. Por su parte, Casierra-Posada & Peña-Olmos (2011) expusieron plantas de fresa a coberturas plásticas de diversos colores y hallaron que las diferentes calidades de luz influyeron sobre el contenido de clorofila. Además, la concentración de clorofila *a* fue mayor en hojas desarrolladas bajo luz de color verde y rojo, seguida de la encontrada en plantas expuestas a la cobertura de color azul, transparente y amarilla.

Assumiendo que las diferentes bandas del espectro de radiación pueden influenciar el transporte de electrones y los demás parámetros relacionados con la fluorescencia de la clorofila en plantas de fresa, se evaluó el efecto de la calidad espectral de la luz sobre la eficiencia fotoquímica del fotosistema II, bajo condiciones de invernadero en el trópico alto.

## MATERIALES Y MÉTODOS

El ensayo, se desarrolló en la ciudad de Tunja, Departamento de Boyacá, en Colombia (5°33'16.25"N 73°21'9.14"O; 2.691 msnm), bajo condiciones de invernadero de vidrio transparente, en el cual, diez plantas por tratamiento se sometieron a la exposición de la radiación solar, filtrada a través de películas de polipropileno de colores rojo, amarillo, azul y transparente, de un grosor de 15 $\mu$ . Las plantas control, se desarrollaron dentro del invernadero, sin ningún tipo de cobertura de polipropileno. La radiación fotosintéticamente

activa (PAR) y la disminución de la luz (opacidad) registrada bajo las coberturas, se muestra en la tabla 1. De igual manera, la transmitancia de los diferentes materiales utilizados en el ensayo, se presentan en la figura 1. A pesar que el vidrio es traslúcido, este tipo de invernadero ofrecía a las plantas condiciones de alto sombreadamiento (Tabla 1). Como material vegetal inicial, se tomaron estolones (importadas desde Chile) de fresa cultivar 'Chandler', que se expusieron previamente a una temperatura de  $4 \pm 1^\circ\text{C}$ , durante tres semanas, con la intención de romper la dormancia de las yemas

y lograr una brotación rápida y uniforme; posteriormente, los estolones se colocaron en una solución nutritiva, con la siguiente composición en  $\text{mg L}^{-1}$ : nitrógeno nítrico, 40,3; nitrógeno amoniacal, 4,0; fósforo, 20,4; potasio, 50,6; calcio, 28,8; magnesio, 11,4; azufre, 1,0; hierro, 1,12; manganeso, 0,112; cobre, 0,012; zinc, 0,0264; boro, 0,106; molibdeno, 0,0012 y cobalto, 0,00036. Estas concentraciones corresponden a dosis utilizadas frecuentemente para cultivos hidropónicos. Se realizaron dos aplicaciones con base en Captan, para prevenir la aparición de problemas fitopatológicos, especialmente *Mycosphaerella fragariae*.

Tabla 1. Características de radiación fotosintéticamente activa y opacidad registradas bajo las coberturas de polipropileno de colores.

Color de la cobertura	Radiación fotosintéticamente activa (PAR)	Opacidad
	( $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ )	(%)
Amarillo	152,19	49,25
Azul	99,31	66,89
Rojo	86,95	71,01
Verde	78,87	73,70
Transparente	210,46	29,83
Control	299,94	0,00

A las 32 semanas del trasplante, se midió la fluorescencia de la clorofila en hojas completamente expandidas del tercio medio de la corona, con un pulso actínico de luz de  $25 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ , mediante el uso de un fluorómetro Junior-PAM (Walz GmbH, Effeltrich, Germany). Previo a las mediciones, las hojas se expusieron a la oscuridad con pinzas de exclusión de luz. Se realizaron las siguientes mediciones: fluorescencia mínima ( $F_0$ ) y fluorescencia máxima ( $F_m$ ). Con el uso de estos parámetros, se calculó la eficiencia fotoquímica del PSII:  $F_v/F_m = (F_m - F_0)/F_m$ , y la fluorescencia variable:  $F_v = F_m - F_0$ . Estas fórmulas fueron calculadas para el análisis cuantitativo de la reacción de producción de fluorescencia, acorde con la curva llamada "cinética de Kautsky" (González *et al.* 2008).

Se empleó un diseño en bloques al azar, teniendo el color de la cobertura como factor de bloque. Cada tratamiento constaba de diez plantas y se tomó una planta como replicación. En cada planta, se dispuso de una hoja, para un total de 10 mediciones por tratamiento. Los datos obtenidos, se sometieron a un análisis clásico de variancia ( $P < 0,05$ ) y a la prueba de separación de promedios de Tukey, mediante

la aplicación PASW (Predictive Analytics Software) versión 18.0.0 (30-07-2009; IBM Corporation, Somers - USA).

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Las películas de polipropileno, llamadas comúnmente, papel celofán, son bastante selectivas en cuanto a las longitudes de onda que absorben y, por consecuencia, las que transmiten. Efectivamente, el polipropileno azul transfiere mayormente longitudes de onda entre los 440 y 520nm, que corresponden al espectro de color azul y verde. La película de color rojo transmite, en muy poca cantidad luz azul, pero en mayor cantidad, por encima de 610nm, donde se encuentra parte del espectro del rojo y rojo lejano. La película de color verde emite en mayor cantidad de longitudes de onda que se encuentran en el espectro del color verde y el color amarillo (510-540 nm). Por su parte, el polipropileno de color amarillo transmite las longitudes de onda superiores a 530nm, que corresponden al espectro en el rango de los colores verde, amarillo, naranja, rojo y rojo lejano. En cambio, bajo el papel transparente no se produce una selección del espectro y se

transmite, en igual medida, todas las longitudes, entre los 400 y 700nm. Llama la atención, que acorde con la figura 1, el rango máximo de transmitancia de la cobertura de color amarillo se encuentra muy cercano al valor registrado para la cobertura transparente, por tanto, muchas de las variables analizadas presentan tendencias similares en plantas colocadas bajo estas dos coberturas, en especial, los valores de  $F_0$ ,  $F_v/F_m$  y  $F_t$ .

**Crecimiento vegetal:** Se registró diferencia estadísticamente significativa en el peso seco total por planta, el área foliar, el peso específico de las hojas (peso seco por área foliar) y la relación raíz:vástago ( $P < 0,01$ ) (Tabla 2). En cuanto al primer parámetro, las plantas que crecieron bajo las coberturas de colores amarillo, azul y verde fueron estadísticamente diferentes a las del control y presentaron valores de peso seco 14,52; 45,89 y 84,40%, respectivamente, por debajo del control. El área foliar mostró valores estadísticamente difer-

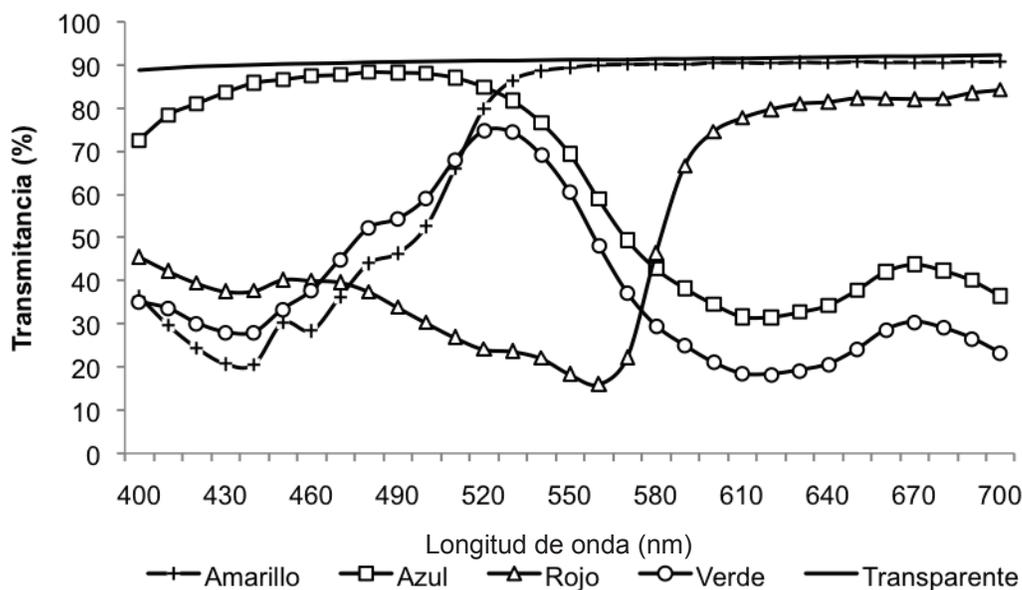


Figura 1. Transmitancia de las películas de polipropileno utilizadas como cobertura en plantas de fresa (*Fragaria* sp.).

Tabla 2. Parámetros de crecimiento determinados en plantas de fresa (*Fragaria* sp.) expuestas a coberturas de color (datos por planta).

Color de la cobertura	Peso seco total	Area foliar	Peso específico de las hojas	Relación raíz:vástago
	(g)	(cm <sup>2</sup> )	(mg cm <sup>-2</sup> )	
Amarillo	34,69 b	776,89 b	8,63 b	0,15 b
Azul	21,96 c	768,73 b	7,14 cd	0,15 b
Rojo	36,44 ab	928,37 a	8,25 bc	0,16 b
Verde	6,33 d	348,22 d	6,40 d	0,39 a
Transparente	37,59 ab	487,26 c	12,14 a	0,18 b
Control	40,58 a	527,14 c	12,12 a	0,20 b

En cada columna, letras diferentes indican diferencias significativas según la prueba de Tukey ( $P < 0,05$ )

entes entre el control y las plantas colocadas bajo las coberturas amarilla, azul, roja y verde. Las tres primeras coberturas, respectivamente, presentaron valores de área foliar 47,37; 45,83 y 76,11%, superiores a los valores del control, mientras que la cobertura de color verde mostró un área foliar, 33,94%, por debajo. El valor del peso específico de las hojas, se redujo en las plantas expuestas a las coberturas de colores amarillo, azul, rojo y verde, cuyo valor promedio, respectivamente, fue 28,75; 41,09; 31,89 y 47,19%, inferior al encontrado en las del control sin cobertura. Por último, el valor promedio de la relación raíz:vástago sólo fue estadísticamente diferente entre las plantas expuestas a la cobertura verde y las que crecieron sin cobertura; las primeras presentaron un valor 92,88% superior a la segundas, en cuanto a esta relación alométrica (Tabla 2).

De manera usual, el incremento del área foliar es una estrategia para aumentar la superficie fotosintéticamente activa, así se mejora la eficiencia en los procesos de captación de energía, con el fin de garantizar la producción con intensidades lumínicas bajas (Valladares & Niinemets, 2008); sin embargo, en el caso de la cobertura de color verde, no ocurrió así. A pesar que esta cobertura presentó el mayor grado de opacidad, con lo cual se debería haber incrementado el

área foliar, sucedió lo contrario, lo que permite deducir que, más que el sombreado causado por la cobertura, el área foliar fue afectada por el color.

Como consecuencia de la luz filtrada a través de los filmes de color, se apreciaron modificaciones morfoanatómicas en las plantas expuestas a las diferentes coberturas (Figura 2). En el análisis estadístico de la asignación de masa seca a los diferentes órganos en los que se seccionó la planta, se advirtieron diferencias altamente significativas en todos los casos ( $P < 0,01$ ). Se observó que el menor porcentaje de acumulación de masa seca (AMS) en la raíz, se presentó en plantas expuestas a las coberturas amarilla y azul, mientras que la cobertura verde, registró el mayor valor. En la corona, se asignó menor cantidad de masa seca bajo la cobertura amarilla y en las plantas control y el mayor valor, se encontró bajo las coberturas azul y verde. Las plantas control mostraron la menor AMS en las hojas y la mayor se presentó en plantas colocadas bajo las coberturas de colores azul y verde. La cobertura de color rojo indujo la menor AMS en los estolones, mientras que el mayor porcentaje se presentó bajo el color verde. La cobertura transparente redujo la AMS en las flores y la de color verde, la aumentó. En cuanto a los frutos, se registró la menor AMS con la exposición de las plantas al color verde y, por el contrario, bajo la cobertura de color amarillo, se registró la mayor AMS.

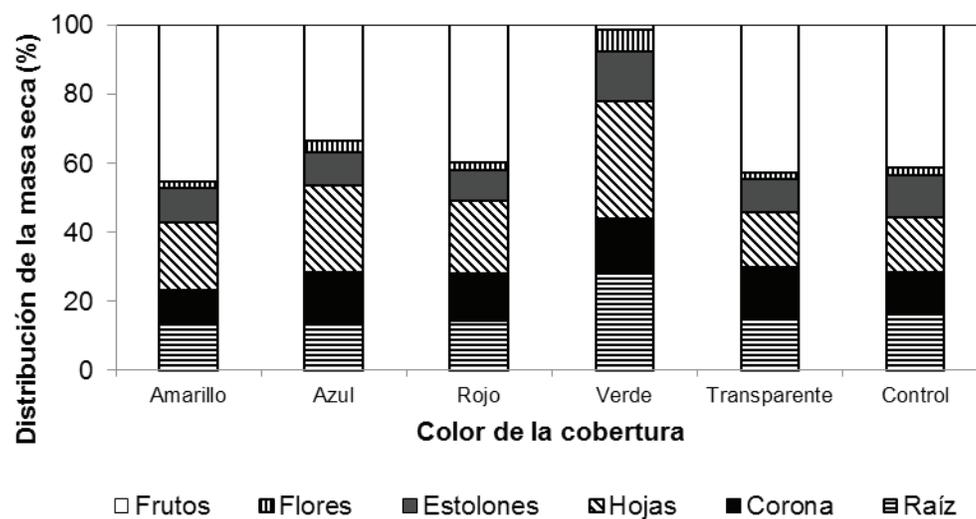


Figura 2. Distribución de la masa seca en plantas de fresa (*Fragaria* sp.), expuestas a coberturas de color.

Las variaciones de la relación raíz:vástago (Tabla 2) son el resultado de la interacción de la calidad de la luz y el sombreado proporcionadas por las coberturas, debido a que existen parámetros anatómicos, morfológicos y fisiológicos de mayor o menor plasticidad, ante la variación de la calidad de luz (Terashima *et al.* 2005). Además, la teoría de la partición óptima supone que las plantas responden a las variaciones en la disponibilidad de recursos, mediante la partición preferencial de recursos entre los distintos órganos, de forma de optimizar así la captura de los mismos y maximizar, consecuentemente, la tasa de crecimiento (Hirose, 1987).

Así, el análisis de los patrones de asignación de biomasa resulta ser la mejor herramienta disponible para la investigación de las funciones prioritarias de las plantas (Weiner, 2004). Se asume que los organismos disponen de una cantidad limitada de recursos que deben ser divididos entre las principales funciones, generándose así relaciones de compromiso (tradeoffs), entre las mismas. Dado que los destinos son mutuamente excluyentes, los recursos destinados a una función o estructura, no están disponibles para otra (Reekie & Bazzaz, 1987). En el presente estudio, la modificación más llamativa se halló en plantas colocadas bajo la cobertura de color verde, lo cual, pudo ser la consecuencia del sombreado causado por el polipropileno, pero también, se debe considerar que este material transmitió en mayor cantidad en un rango muy limitado del espectro (colores verde y amarillo: 510-540nm). Además, su transmisión en los rangos del azul y del rojo estuvo alrededor de 20 – 30% (Figura 1). Este aspecto pudo limitar la captura de fotones, puesto que en estas franjas, se encuentra la mayor actividad de absorción de las clorofilas (Manrique, 2003). También, es conocido que el desempeño fotosintético depende de características bioquímicas y fitoquímicas, como la actividad de la enzima Rubisco y otras enzimas del ciclo C<sub>3</sub>, el contenido de clorofila

a, y la eficiencia de los fotosistemas I y II y, en consecuencia, la disponibilidad de los productos ATP y NADPH (Chen *et al.* 1999). Por lo tanto, en el presente estudio, las plantas colocadas bajo la cobertura de color verde presentaron la menor AMS total en la planta, menor área foliar, menor peso específico de las hojas, en relación con los demás tratamientos, pero el mayor valor de la relación raíz:vástago.

Estos resultados indican que serían necesarios más estudios bajo diferentes intensidades de luz y de bandas de color específicas. En comunidades vegetales en campo, la distribución de luz no es uniforme, ya que presenta menor intensidad en la parte baja del perfil de las plantas. Además, existen diferentes bandas de luz dentro del perfil vegetal con variaciones desde la parte superior hasta la inferior, por tanto, es posible que las hojas inferiores reflejen más luz en el rango del verde que afecta la estructura y la función de las hojas vecinas. En este caso, los resultados reportados en el presente estudio tienen implicaciones agronómicas en relación de las densidades apropiadas de plantas.

Con vista en la importancia del cultivo de fresa y otros cultivos, en el departamento de Boyacá y otras ecozonas similares de Colombia, se deben iniciar investigaciones estratégicas agronómicas, apoyadas en estudios eco-fisiológicos, los cuales, serían de gran importancia para el desarrollo agrícola nacional.

Fluorescencia de la clorofila a: El análisis de variancia arrojó diferencias altamente significativas para la F<sub>o</sub> entre los tratamientos (P<0,01) (Tabla 3). Además, se registró un coeficiente de variación de 28,91%. La diferencia se expresó, básicamente, entre las plantas que se desarrollaron bajo la cobertura amarilla y las plantas control sin cobertura, en donde la primera indujo un valor de F<sub>o</sub> 89,32% mayor que en las plantas control.

Tabla 3. Valores promedio de parámetros de fluorescencia determinados en plantas de fresa (*Fragaria* sp.) expuestas a coberturas de color (datos por planta).

Color de la cobertura	Fluorescencia mínima	Fluorescencia terminal	Fluorescencia variable	Fluorescencia máxima
	(F <sub>o</sub> )	(F <sub>t</sub> )	(F <sub>v</sub> )	(F <sub>m</sub> )
Amarillo	644,33 a	646,00 a	1273,67 ab	1918,00 a
Azul	406,33 ab	409,33 bc	1372,67 a	1779,00 a
Rojo	443,67 ab	451,00 abc	1315,00 a	1758,67 a
Verde	407,33 ab	411,00 abc	1362,33 a	1769,67 a
Transparente	617,00 a	624,33 ab	977,33 bc	1594,33 ab
Control	340,33 b	344,67 c	938,67 c	1279,00 b

En cada columna, letras diferentes indican diferencias significativas según la prueba de Tukey (P<0,05)

Además, se apreció un aumento en el valor promedio de  $F_0$  en plantas expuestas a las coberturas transparente y amarilla. Como ya se había mencionado, la cobertura amarilla presenta su máxima transmitancia muy cercana al valor registrado para la cobertura transparente, por sobre los 530nm, por tanto, las respuestas morfo-fisiológicas que se pudieran producir en las plantas, por parte del espectro en el rango del verde al rojo, serían idénticas en las plantas, bajo estas dos coberturas. Gonçalves *et al.* (2001) notaron que bajo plena iluminación, en relación con plantas sombreadas, el valor de  $F_0$  se reduce en *Swietenia macrophylla*, mientras que esta medida no se altera en *Dipteryx odorata*, bajo las mismas condiciones, lo cual, implica diferencias genéticas.

Este primer nivel ( $F_0$ ) es un indicativo de la plena actividad de los centros de reacción en la clorofila y pigmentos asociados. Refleja la pérdida de una parte de la energía absorbida por las moléculas-antena antes que éstas hayan podido transferir la energía de excitación hacia los centros de reacción (Briantais *et al.* 1986). Este nivel corresponde a un estado, donde todos los aceptores primarios de electrones del PSII (Quinona A) están oxidados (con carga energética positiva y falta de electrones), por tanto, es independiente de los procesos fotoquímicos. El incremento en la  $F_0$  y la reducción del valor de la relación  $F_v/F_m$ , representan alteraciones a nivel de los centros de reacción del fotosistema II, reducción tanto en la capacidad fotosintética reducida como en la eficiencia fotoquímica (Willits & Peet, 2001), daños colaterales o deterioro en la maquinaria fotosintética de la hojas y, en consecuencia, reducida fijación de  $CO_2$  (Percival & Henderson, 2003). De hecho, en un estudio realizado por Casierra-Posada & Peña-Olmos (2011), bajo las mismas características y condiciones, se encontró que bajo las coberturas amarilla y transparente, el contenido de clorofila total fue bajo, en comparación con las coberturas de los demás colores, mientras que la relación carotenos / clorofila total fue alta, con lo cual, se pudo inferir, que la alta cantidad de los carotenos podría tener una función protectora, puesto que estos compuestos (carotenos y xantofilas) presentan en las plantas una función doble, como pigmentos accesorios en la captación de energía lumínica y como moléculas capaces de disipar la energía de excitación excedente en forma de calor, evitando daños importantes, llamados *fitoinhibición* (Manrique, 2003; Demmig-Adams & Adams, 1992).

El valor registrado para la  $F_v$  mostró diferencias altamente significativas ( $P < 0,01$ ), entre el control y las plantas expuestas a las demás coberturas, con excepción de la cobertura transparente, con un coeficiente de variación de 17,20%. Las plantas colocadas bajo las coberturas amarilla, azul, roja y verde presentaron valores de  $F_v$ , 35,68; 46,23; 40,09 y 45,13% más elevados que las plantas que crecieron sin cobertura (Tabla 3).

La respuesta más importante de la planta, en el caso de la fluorescencia determinada en hojas adaptadas a la oscuridad, es la  $F_v$  (Vieira *et al.* 2010). Mientras mayor es el valor de la  $F_v$  mayor será la capacidad del PSII para realizar la fotoquímica primaria y, en consecuencia, mayor será la capacidad de asimilar de  $CO_2$ , en los procesos bioquímicos de la fotosíntesis (Baker & Rosenqvist, 2004), lo cual, no se vio reflejado en los resultados del presente trabajo, puesto que el valor de  $F_v$  en todos los tratamientos, fue superior al de las plantas control sin cobertura; no obstante, estas últimas presentaron mayor producción de peso seco total, acorde con la tabla 2, lo que pudo ser la consecuencia de una mayor capacidad de disipación de la energía capturada, por el PSII, en forma de calor (Non-photochemical quenching).

Alternativamente, con menos área foliar por planta, pero con hojas más pesadas (peso específico alto, debido a mayor cantidad de componentes fotosintéticos y bioquímicos por unidad de área foliar (Tabla 2), la producción superior de biomasa en plantas control fue posible, debido a una mayor tasa de fijación de  $CO_2$  por unidad de área foliar. También, es posible que la densidad estomática (número por área foliar) y, como resultante, la conductancia foliar de difusión de  $CO_2$ , hayan sido mayores en plantas sin cobertura. Es conocido que la tasa de fotosíntesis es positivamente asociada con la conductancia estomática, como por ejemplo, en el cultivo de yuca (El-Sharkawy, 2007). Factores relacionados con la anatomía foliar, características estomáticas y fisiológicas, como la tasa de fotosíntesis y bioquímicas, como cantidad y actividad de enzimas afectadas por la intensidad y calidad de luz, merecen más estudios en el futuro cercano.

Las lecturas registradas para la  $F_m$  mostraron que hubo diferencia altamente significativa ( $P < 0,01$ ), entre las plantas control y las aquellas expuestas a las demás coberturas, con excepción de las que crecieron bajo la cobertura transparente. Adicionalmente, se halló un coeficiente de variación de 14,95%. Las plantas que se desarrollaron bajo las coberturas amarilla, azul, roja y verde presentaron valores de  $F_m$  49,96; 39,09; 37,50 y 38,36% más elevados, que las plantas control sin cobertura (Tabla 3).

Se debe considerar que en este estudio, se utilizó un pulso actínico de luz  $25 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ , con miras a lograr el valor de  $F_m$ , por tanto, al aumentar la cantidad de luz, tiene lugar una conversión progresiva de violaxantina en zeaxantina y un incremento en la concentración relativa de las formas deepoxidadas del ciclo de las xantofilas, frente a las más epoxidadas; por ende, existe un incremento gradual del estado de deepoxidación (DPS) del ciclo de las xantofilas, que se correlaciona con la disminución de la eficiencia fotoquímica del PSII, medida mediante fluorescencia de la clorofila *a* (Man-

rique, 2003). El valor de  $F_m$  fue superior en todos los tratamientos, en relación con el obtenido en las plantas control, lo que sería un índice de disipación de la energía capturada, en forma de fluorescencia, lo que impactó negativamente la producción de masa seca, mostrada en la tabla 2. Este resultado, se puede corroborar con el reporte de Casierra-Posada *et al.* (2011), quienes utilizaron la información colectada en el presente estudio, para realizar un análisis del crecimiento en las plantas y encontraron que la tasa de asimilación neta (TAN: la tasa de producción de biomasa total por área foliar) se redujo en las plantas expuestas a todas las coberturas de color, en relación con las plantas control, con excepción de la cobertura transparente. Estos hallazgos muestran que la tasa de fotosíntesis neta basada en área foliar ( $P_N$ ) fue afectada negativamente por las diferentes coberturas de color.

El ciclo de las xantofilas es un proceso flexible, que responde a las condiciones lumínicas, como fluctuaciones diurnas, insolaciones puntuales o transiciones sol-sombra o los llamados 'sunflecks', dentro del perfil vegetal (Demmig-Adams & Adams, 1992). En el ambiente natural, los vegetales están sometidos a la acción de estos y otros factores ambientales, que modulan su respuesta en conjunto; sin embargo, las diferentes especies responden de forma muy diferente a las fluctuaciones. Estas diferencias fisiológicas entre especies son las que contribuyen, de forma definitiva, a las diferencias funcionales y adaptativas entre ecosistemas (Manrique, 2003).

Se apreció diferencia altamente significativa en los valores registrados para la eficiencia fotoquímica del PSII ( $F_v/F_m$ ) ( $P < 0,01$ ), con un coeficiente de variación de 9,28%. Esta diferencia se manifestó en especial, en el valor registrado en las plantas control sin cobertura y las que crecieron bajo la cobertura transparente, las cuales, exhibieron un valor de  $F_v/F_m$  16,57% menor que las plantas del tratamiento control (Figura 3).

$F_v/F_m$  se correlaciona bien con el rendimiento cuántico fotosintético, medido como la producción de  $O_2$  o el consumo de  $CO_2$  a bajas irradiancias. Una reducción en  $F_v/F_m$  puede ser generada por una reducción en  $F_m$  y/o por un incremento en  $F_0$ , como sucedió en el presente trabajo, en el cual, la reducción en el valor de  $F_v/F_m$  en las plantas expuestas a las coberturas amarilla y transparente, con respecto a las plantas control, se debió al aumento en el valor de  $F_0$ , y no a la reducción del valor de  $F_m$ . Valores de  $F_v/F_m$  en el rango de 0,78 a 0,85, se asocian con plantas sanas y no estresadas (Percival, 2004). La reducción en el valor de la relación  $F_v/F_m$  encontrado en el presente estudio en plantas que crecieron bajo las coberturas de colores amarillo y transparente, posiblemente, se atribuya a un estado alto de reducción del primer receptor de electrones (el pool de  $Q_A$ ), que conlleva a una variación en la tasa de transporte de electrones (Baker & Rosenqvist, 2004). Por otro lado, los valores de la relación  $F_v/F_m$  encontrados en plantas expuestas a las coberturas de

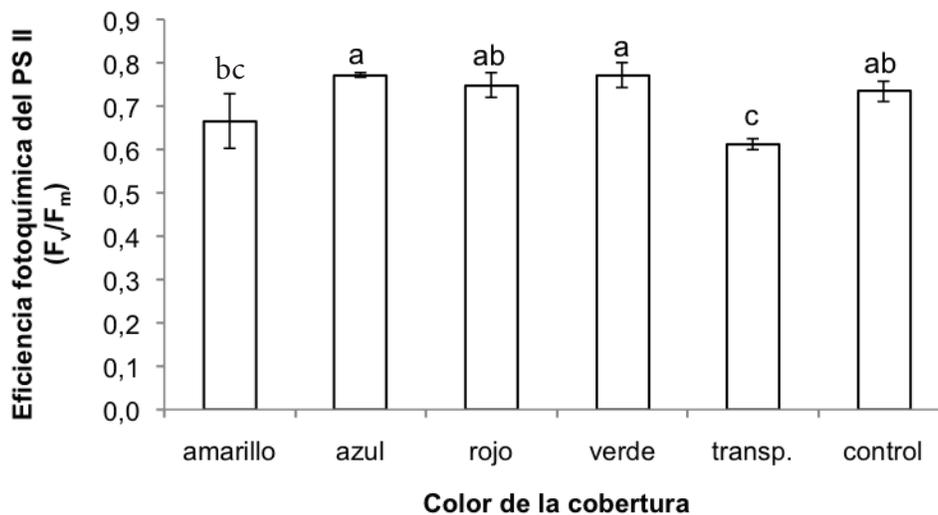


Figura 3. Eficiencia fotoquímica del PS II determinada en plantas de fresa (*Fragaria sp.*), expuestas a coberturas de color.

color azul, rojo y verde, posiblemente, se encuentren relacionados con la eficiencia de los mecanismos fotoprotectores, que pueden modular la probabilidad de fotodaño, mediante ajustes morfológicos, cambios en el tamaño de la antena y activación de rutas alternas de transporte de electrones (Niyogi, 1999).

Por último, se encontró diferencia estadísticamente significativa en las mediciones de  $F_t$  ( $P < 0,01$ ). Las plantas expuestas a todas las coberturas presentaron valores de  $F_t$  superiores a las plantas control (Tabla 3). Al respecto, Bacarin & Mosquim (2002), mencionan que el aumento del valor de este parámetro, normalmente viene acompañado de un incremento en la tasa de fotosíntesis neta ( $P_N$ ), como resultante de mayor asimilación de  $CO_2$ , con utilización de ATP y de NADPH en la fase bioquímica, los cuales, se produjeron en la fase fotoquímica; sin embargo, por el contrario al reporte de estos autores, en este estudio, los valores registrados para el peso seco total en plantas, bajo todas las coberturas, disminuyó (Tabla 2) y se puede interpretar como una reducción en la tasa de asimilación, lo cual, fue corroborado por Casierra-Posada *et al.* (2011) quienes, con las mismas plantas del presente estudio, hallaron que la tasa de asimilación neta se redujo en las plantas expuestas a todas las coberturas de color, en relación con las del control, excepto en aquellas bajo la cobertura transparente.

**Conflicto de intereses:** El manuscrito fue preparado y revisado con la participación de todos los autores, quienes declaramos que no existe ningún conflicto de intereses que ponga en riesgo la validez de los resultados presentados. **Financiación:** Este estudio se desarrolló con el apoyo de la Dirección de Investigaciones (DIN) de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia (UPTC), en el programa Jóvenes Investigadores UPTC, con el soporte del grupo de investigación Ecofisiología Vegetal, adscrito al programa de Ingeniería Agronómica de la Facultad de Ciencias Agropecuarias de la UPTC.

## BIBLIOGRAFÍA

- BACARIN, M.A.; MOSQUIM, P.R. 2002. Cinética de emissão de fluorescência das clorofilas de dois genótipos de feijoeiro. *Ciência e Agrotecnologia*, Lavras. 26(4):705-710.
- BAKER, N.R.; ROSENQVIST, E. 2004. Applications of chlorophyll fluorescence can improve crop production strategies: an examination of future possibilities. *J. Exp. Bot.* 55(403):1607-1621.
- BRADBURNE, J.A.; KASPERBAUER, M.J.; MATHIS, J.N. 1989. Reflected Far-Red light effects on chlorophyll and light-harvesting chlorophyll protein (LHC-II) contents under field conditions. *Plant Physiol.* 91(3):800-803.
- BRIANTAIS, J.M.; VERNOTTE, C.; KRAUSE, G.H.; WEIS, E. 1986. Chlorophyll fluorescence of higher plant chloroplasts and leaves. In: Govindjee, J.A.; Fork, D.C., Eds. *Light emission by plants and photosynthetic bacteria*. Academic Press, New York. p.539-577.
- CASIERRA-POSADA, F.; ROJAS B., J.F. 2009. Efecto de la exposición del semillero a coberturas de colores sobre el desarrollo y productividad del brócoli (*Brassica oleracea* var. *italica*). *Agr. Col.* 27(1):49-55.
- CASIERRA-POSADA, F.; PEÑA-OLMOS, J.E. 2011. Contenido de pigmentos en hojas de fresa (*Fragaria* sp) expuestas a diferente calidad espectral. *Agr. Col.* (en prensa).
- CASIERRA-POSADA, F.; PEÑA-OLMOS, J.E.; ULRICH, C. 2011. Análisis básico del crecimiento en plantas de fresa (*Fragaria* sp.) expuestas a diferente calidad de luz. *Agr. Col.* (en prensa).
- CHEN, K.; HU, G.; KEUTGEN, K. 1999. Effects of NaCl and  $CO_2$  enrichment on pepino (*Solanum muricatum* Ait) II. Leaf photosynthetic properties and gas exchange. *Sci. Hort.* 81:43-56.
- DECOTEAU, D.R. 2008. The emergence and early development of colored reflective plastic mulch technology in agriculture. En: Stevens, C.; Khan, V.A. (eds). *Recent advances in agriculture*. Research Signpost. Kerala, India. p.1-17.
- DEMMIG-ADAMS, B.; ADAMS, III W.W. 1992. Photochemical and other responses of plants to high light stress. *Ann. Rev. Plant Physiol. Plant Mol. Biol.* 43:599-626.
- EL-SHARKAWY, M.A. 2007. Physiological characteristics of cassava tolerance to prolonged drought in the tropics: Implications for breeding cultivars adapted to seasonally dry and semiarid environments. *Braz. J. Plant Physiol.* 19(4):257-286.
- FOLTA, K.M.; MARUHNICH, S.A. 2007. Green light: a signal to slow down or stop. *J. Exp. Bot.* 58:3099-3111.

13. FUKUDA, N.; FUJITAN, M.; OHTA, Y.; SASE, S.; NISHIMURA, S.; EZURA, H. 2008. Directional blue light irradiation triggers epidermal cell elongation of abaxial side resulting in inhibition of leaf epinasty in geranium under red light condition. *Sci. Hort.* 115:176-182.
14. GONÇALVES, J.F. de C.; MARENCO, R.A.; VIEIRA, G. 2001. Concentration of photosynthetic pigments and chlorophyll fluorescence of Mahogany and Tonka bean under two light environments. *Rev. Bras. Fisiol. Veg.* 13(2):149-157.
15. GONZÁLEZ M., S.; PERALES V, H.; SALCEDO A., M.O. 2008. La fluorescencia de la clorofila a como herramienta en la investigación de efectos tóxicos en el aparato fotosintético de plantas y algas. *Rev. Educación Bioquímica.* 27(4):119-129.
16. HALIAPAS, S.; YUPSANIS, T.A.; SYROS, T.D.; KOFIDIS, G.; ECONOMOÛ, A.S. 2008. *Petunia x hybrida* during transition to flowering as affected by light intensity and quality treatments. *Acta Physiol. Plant.* 30:807-815.
17. HIROSE, T. 1987. A vegetative plant growth model: Adaptive significance of phenotypic plasticity in matter partitioning. *Functional Ecol.* 1:195-202.
18. IMAIZUMI, T.; TRAN, H.G.; SWARTZ, T.E.; BRIGGS, W.R.; KAY, S.A. 2003. FKF1 is essential for photoperiodic-specific light signalling in *Arabidopsis*. *Nature.* 426:302-306.
19. JIAO, Y.; LAU, O.S.; DENG, X.W. 2007. Light-regulated transcriptional networks in higher plants. *Nat. Rev. Genet.* 8:217-230.
20. LOUGHRIN, J.H.; KASPERBAUER, M.J. 2002. Aroma of fresh strawberries is enhanced by ripening over red versus black mulch. *J. Agric. Food Chem.* 50:161-165.
21. MANRIQUE, E. 2003. Los pigmentos fotosintéticos, algo más que la captación de luz. *Ecosistemas* 12(1). Disponible desde internet en: [http://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/8958/1/ECO\\_12%281%29\\_08.pdf](http://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/8958/1/ECO_12%281%29_08.pdf). (con acceso 22/07/2011).
22. MIRANDA, J.H.; WILLIAMS, R. 2007. Developmental influence of in vitro light quality and carbon dioxide on photochemical efficiency of PS II of strawberry leaves (*Fragaria x ananassa*). *J. Appl. Hort.* 9(1):13-16.
23. MATHEWS, S. 2010. Evolutionary studies illuminate the structural-functional model of plant phytochromes. *The Plant Cell.* 22:4-16.
24. NIYOGI, K.K. 1999. Photoprotection revisited: Genetic and molecular approaches. *Ann. Rev. Plant Physiol. Plant Molec. Bio.* 50:333-359.
25. PERCIVAL, G.C. 2004. Evaluation of physiological tests as predictors of young tree establishment and growth. *J. Arboric.* 30(2):80-92.
26. PERCIVAL, G.C.; HENDERSON, A. 2003. An assessment of the freezing tolerance of urban trees using chlorophyll fluorescence. *J. Hortic. Sci. Biotech.* 78(2):254-260.
27. REEKIE, E.G.; BAZZAZ, F.A. 1987. Reproductive effort in plants: effect of reproduction on vegetative activity. *Am. Naturalist.* 129:907-919.
28. SHAHAK, Y.; GAL, E.; OFFIR, Y.; BEN-YAKIR, D. 2008. Photosensitive Shade Netting Integrated with Greenhouse Technologies for Improved Performance of Vegetable and Ornamental Crops. *Acta Hort.* 797:75-80.
29. STRASSER, B.; SÁNCHEZ-LAMAS, M.; YANOVSKY, M.J.; CASAL, J.J.; CERDÁN, P.D. 2010. *Arabidopsis thaliana* life without phytochromes. *Proc. Nat. Acad. Sci. U.S.A.* 107:4776-4781.
30. TERASHIMA, I.; HANDA, Y.T.; TAZOE, Y.; VYAS, P.; YANO, S. 2005. Irradiance and phenotype: comparative eco-development of sun and shade leaves in relation to photosynthetic CO<sub>2</sub> diffusion. *J. Exp. Bot. Phenotypic Plasticity and the Changing Environm. Special Issue.* 57(2):343-354.
31. VALLADARES, F.; NIINEMETS, Ü. 2008. Shade Tolerance, a Key Plant Feature of Complex Nature and Consequences. *Ann. Rev. Ecol. Evolution and Systematics.* 39:237-257.
32. VIEIRA, D.A. de P.; PORTES, T. de A.; STACCIARINI-SERAPHIN, E; TEIXEIRA, J.B. 2010. Fluorescência e teores de clorofilas em abacaxizeiro cv. pérola submetido a diferentes concentrações de sulfato de amônio. *Rev. Bras. Frutic.* 32(2):360-368.
33. WEINER, J. 2004. Allocation, plasticity and allometry in plants. *Perspectives in Plant Ecol., Evol. and Systematics.* 6(4):207-215.

34. WILLITS, D.H.; PEET, M.M. 2001. Using chlorophyll fluorescence to model leaf photosynthesis in greenhouse pepper and tomato. *Acta Hortic.* 507:311315.

Recibido: Julio 24 de 2011

Aceptado: Noviembre 2 de 2011

# **EVALUACIÓN DEL RENDIMIENTO Y SUS COMPONENTES EN GENOTIPOS DE CEBADA (*Hordeum vulgare* L.) DIFERENCIADOS POR SU TIPO DE ESPIGA Y GRANO**

## **EVALUATION OF YIELD AND ITS COMPONENTS IN BARLEY (*Hordeum vulgare* L.) GENOTYPES DIFFERENTIATED FOR SPIKE AND KERNEL TYPES**

Diana Katherinne Rios<sup>1</sup>, Rodrigo Britto<sup>2</sup>, Hernando Delgado<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Ingeniero Agrónomo. Grupo Manejo Biológico de Cultivos. GMBC. Facultad de Ciencias Agropecuarias, Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia (UPTC). Av. Central del Norte, Tunja, Colombia. e-mail: dianakatherinne.rios@uptc.edu.co <sup>2</sup> Ing. Agrónomo. Fitomejorador Ph.D. Programa Mejoramiento Genético de Cereales Menores, FENALCE, Tunja, Colombia. e-mail: rbritto2@yahoo.com <sup>3</sup> Ing. Agrónomo. M.Sc. Fitotecnia: Genética y Fitomejoramiento. Profesor Asistente. Grupo Manejo Biológico de Cultivos. GMBC. Facultad de Ciencias Agropecuarias, Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia (UPTC). Av. Central del Norte, Tunja, Colombia. e-mail: hernando.delgado@uptc.edu.co.

Rev. U.D.C.A Act. & Div. Cient. 14(2) 55 - 63, 2011

### **RESUMEN**

Con el objeto de poder determinar en el futuro los cruzamientos más deseables al combinar cuatro tipos de cebada, se estudió en Duitama y en Samacá (Boyacá, Colombia), el efecto diferencial del tipo de espiga y de grano en el rendimiento final y sus componentes, de doce genotipos, en un diseño de parcelas divididas, con cuatro repeticiones. Se efectuó análisis de varianza para cada una de las localidades y características evaluadas, tomando el promedio del grupo de los genotipos involucrados. La comparación de medias de tratamientos, se realizó por el método de Diferencia Mínima Significativa. Los genotipos con espigas de dos carreras produjeron mayor número de macollas efectivas (Samacá) y granos más pesados (Duitama, Samacá), mientras que los de seis carreras tuvieron un mayor número de granos por espiga (Duitama, Samacá). Adicionalmente, en Duitama, los genotipos con granos desnudos produjeron mayor número de granos, pero los de granos cubiertos dieron granos más pesados. La interacción entre el número de carreras y el tipo de grano solo presentó significancia para el número de granos por espiga, en la localidad de Duitama. En cuanto al rendimiento de grano seco en Duitama, ninguna de las fuentes de variación mostró efectos significativos. Respecto al número de carreras, se pudo deber a compensación entre los componentes del rendimiento, algunos mayores y otros menores en uno u otro tipo, entre las cebadas de dos y seis carreras evaluadas.

Palabras clave: Cebada, características, carreras, grano.

### **SUMMARY**

In order to avoid no desired crosses to combine four types of barley, the differential effect of spike type and grain on final yield and its components was studied in twelve genotypes at Duitama and Samacá (Boyacá, Colombia) in a split-plot design with four replications. An analysis of variance was practiced, locally, for each variable taking the mean genotype groups as a treatment and not an individual genotype. Differences among treatments were determined by a Least Significance Difference. Two-rowed barley genotypes gave a higher number of effective tillers (Samacá) and heavier kernels (Duitama, Samacá); while, six-rowed barley genotypes had a greater number of kernels/spike (Duitama, Samacá). Additionally, in Duitama, hull absent kernel barley genotypes produced a greater number of kernels/spike; but, hulled kernel barley genotypes gave heavier kernels. The row number x hull prevalence interaction only affected the kernels/spike number (Duitama). As for the yield of dry grain in Duitama, none of the sources of variation presented significant effects. With regard to the row number, this may be due to compensation between the yield components, some higher than others in one or another type, between the two-rowed and six-rowed barleys evaluated.

Key words: Barley, features, rows, kernel.

## INTRODUCCIÓN

La cebada (*Hordeum vulgare* L.) pertenece al grupo de cereales cultivados desde la antigüedad, 7.000 años a.C. En Colombia, desde su introducción, en 1539, fue uno de los principales cultivos de tierra fría, llegando a ocupar hasta 75.600ha, en 1975, que produjeron 122.000t (Rico, 1980). El área sembrada, en el 2009, fue de 6.372ha, con una producción total de 9.034t, reduciéndose en 27,1%, respecto del 2008, por los efectos del fenómeno del niño. Las importaciones de este mismo año alcanzaron 189.186t (FENALCE, 2009), por lo que se está muy lejos de suplir la demanda, a nivel nacional.

En el país, se siembran los cuatro tipos de cebada, que resultan de la combinación del número de carreras en la espiga y la persistencia de las glumillas del grano: las de dos y seis carreras, cada una con granos desnudos y cubiertos. El objetivo principal del fitomejoramiento en cereales menores en Colombia, ha sido el obtener genotipos con adecuados rendimientos de grano, resistentes a las enfermedades, especialmente roya amarilla, y con una buena calidad. El rendimiento es quizá la parte más importante, ya que determina que se siembre o no un genotipo dado, por parte de los agricultores.

El rendimiento de grano ha sido descrito como el volumen de un paralelepípedo, en el cual, el número de espigas por unidad de superficie, el número de granos por espiga y el peso de los granos, constituyen las aristas. Un incremento en cualquiera de los tres componentes determinará un aumento del rendimiento, siempre y cuando no haya una disminución correspondiente en los otros dos (Barriga, 1974; Ataei, 2006).

Okuyama *et al.* (2005) encontraron que en trigo, el diámetro del tallo, la longitud de la espiga y la altura de planta, fueron los caracteres más relacionados con el mayor rendimiento de grano. Aproximadamente, el 72% de la variación en el rendimiento de los cereales está relacionada al número de espigas fértiles, número de granos por espiga y el peso del grano. Así mismo, estos componentes tienen una correlación positiva y altamente significativa con el rendimiento en cebada (Ataei, 2006). Según Castañeda-Saucedo *et al.* (2009), el número de espigas por metro cuadrado es el componente que mayor contribución tiene en el rendimiento en cereales de grano pequeño.

El primer componente del rendimiento de grano es el número de macollas, que causa un incremento de área foliar o fotosintética. El segundo componente es el número de granos por espiga; este componente del rendimiento de grano en cebada identifica la etapa de crecimiento y el estado

reproductivo y va a depender del número de flores que son polinizadas y del número de flores polinizadas que se llenan y se convierten en grano (Ataei, 2006). El tercer componente es el peso del grano; diversos genes individuales afectan el peso del grano (Rasmusson, 1985). Se ha demostrado que la translocación de materiales asimilados puede responder por cerca del 30% de peso final del grano (Gallagher *et al.* 1975).

Eshghi & Akhundova (2009) plantean que la elección de un procedimiento eficaz de mejoramiento depende, en gran medida, del conocimiento del control genético del carácter a seleccionar. En este sentido, estos mismos autores, a través de un análisis dialélico, en variedades de cebada de grano desnudo, resaltaron los efectos genéticos aditivos, para altura de planta, número de macollas y días a madurez, coincidiendo con lo encontrado por Islam & Darrah (2005) y Verma *et al.* (2007), en genotipos de cebada desnudos y cubiertos; mientras tanto, para el número de granos por espiga, se registraron efectos genéticos de sobredominancia. Dado que la heredabilidad, en sentido estricto del rendimiento de grano por planta fue baja, concluyeron que la mejora directa de éste es, de alguna manera problemática, porque los factores ambientales contribuyen, en gran medida, en su control (Eshghi & Akhundova, 2009). Resultados similares para altura de planta, número de macollas, días a madurez y rendimiento de grano por planta hallaron Singh *et al.* (1999) y Budak (2000). Entre tanto, Rohman *et al.* (2006) reportan que ambos componentes, aditivos y no aditivos, fueron importantes en el control de la herencia de estas características, pero los componentes de dominancia fueron más predominantes que los aditivos.

Eshghi *et al.* (2010) resaltan que efectos genéticos aditivos y de dominancia fueron importantes para la mayoría de los caracteres evaluados, pero dominancia e interacción no alélica tuvieron un efecto más pronunciado para número de granos por espiga en condiciones de sequía y para peso de 1.000 granos y rendimiento de grano en ambos ambientes. La mayor heredabilidad fue para número de granos por espiga en condiciones normales y número de macollas en ambos ambientes, indicando que estos caracteres son controlados por efectos aditivos. Debido a baja ganancia genética y baja heredabilidad para rendimiento de grano comparado con otros caracteres, indicaría que su efecto fenotípico es principalmente controlado por consecuencia ambiental, por lo que sería más recomendable la selección de genotipos superiores con base en componentes del rendimiento, más que por rendimiento de grano.

Varios estudios han identificado loci de caracteres cuantitativos (QTLs) para el rendimiento de grano y sus componentes en cebada. Cakir *et al.* (2003) reportaron tres

QTLs en los cromosomas 2H, 3H y 5H, para rendimiento de grano en cebada. Li *et al.* (2006) identificaron varios QTLs para este mismo carácter y sus componentes, como el número de granos por espiga en el cromosoma 1H.

Arisnabarreta & Miralles (2006) estudiaron el efecto del N aplicado en el rendimiento de grano y sus componentes en cebadas de dos y seis carreras. En ambos tipos, las variaciones en rendimiento de grano fueron explicadas por cambios en granos por unidad de área más que por diferencias en el promedio del peso de grano. En la cebada de dos carreras, los cambios en el número de granos se debieron a variaciones en el número de espigas por m<sup>2</sup>, mientras que en la cebada de seis carreras, se debieron al número de granos por espiga. El hecho que la respuesta a nitrógeno mediante el número de granos por unidad de área en las cebadas de dos y seis carreras es mejor explicado por diferentes subcomponentes del rendimiento, lleva a estos autores a especular acerca que el periodo crítico para la determinación del rendimiento podría diferir entre estos dos tipos de cebada.

Por el papel que juegan el rendimiento de grano y sus componentes en la definición de una línea promisorio como variedad comercial, esta investigación tuvo como objetivo principal evaluar dichas características, en doce genotipos de cebada, diferenciados por tipos de espiga y de grano.

## MATERIALES Y MÉTODOS

La investigación, se realizó en el segundo semestre de 2009, en los municipios de Duitama (Centro Demostrativo Surbatá - ICA, con coordenadas N 5°47', W 73°04' y altitud de 2515 m.s.n.m.) y en Samacá (Vereda Tibaquirá Alto, N 5°29', W 73°30' y altitud de 2665 m.s.n.m.), en el Departamento de Boyacá (Colombia). Se evaluaron doce genotipos de cebada: seis con espigas de seis carreras y los restantes de dos carreras. Cada uno de los grupos tenía tres genotipos con el grano desnudo y tres con el grano cubierto (Cuadro 1). En las dos localidades, se utilizó un diseño de parcelas divididas con cuatro repeticiones, siendo la parcela principal, el número de carreras de la espiga y la subparcela, el tipo de grano. Cada unidad experimental constó de cuatro surcos de cinco metros de largo, con una separación de 30cm.

La densidad de siembra, se calibró por el peso de 1.000 granos y el porcentaje de germinación, de cada genotipo, tomando como base el testigo, la variedad "128", con una densidad de 60kg ha<sup>-1</sup>, de manera que cada uno de los genotipos quedara con igual número de plantas por surco. En los surcos borde, se sembró la selección especial "Tropical", para garantizar la competencia en los surcos iniciales y finales

de cada repetición. La siembra se realizó a chorrillo, el 5 de septiembre de 2009, en Samacá y el 14 de septiembre, en Duitama. Las prácticas culturales de campo, se efectuaron de acuerdo con lo establecido por el ICA, para el manejo de pruebas regionales de cereales menores. La cosecha, se procedió con hoz, en seis fechas diferentes, comprendidas entre el 16 de enero y el 11 de febrero de 2010, debido a la presencia de genotipos precoces y tardíos. Cada uno de los manojos cosechados por unidad experimental fueron trillados separadamente; el grano obtenido fue limpiado y, posteriormente, se tomó peso y humedad, en un medidor electrónico marca Motomco Ion. Al finalizar el ciclo del cultivo, se determinaron las siguientes variables en cada unidad experimental:

Número de macollas efectivas por planta: En 20 plantas en competencia de los surcos centrales en cada unidad experimental, entendiendo como macolla efectiva aquella que produce una espiga que tenga como mínimo un grano.

Número de granos por espiga: De cada una de las 20 plantas seleccionadas, previamente, se tomó la espiga principal, se trilló, de forma individual y se contó el número de granos.

Peso del grano: De la producción total de cada unidad experimental, se tomó el peso de 1.000 granos, en dos repeticiones.

Rendimiento de grano: Con base en el peso y la humedad de la producción total de cada unidad experimental, se determinó en g/parcela al 15% de humedad.

Análisis estadístico: Por ser de mayor interés el inferir acerca de las características de la espiga (carreras) y del grano (desnudez o persistencia de las glumillas), que de un genotipo en particular, para el análisis de varianza, se tomó el promedio del grupo de los genotipos involucrados. Así, para las carreras, se trabajó con el promedio de los seis genotipos (cinco para los de seis carreras, por baja germinación del genotipo número 10) y para la desnudez del grano, con el promedio de los tres genotipos (dos para los de seis carreras, grano desnudo, por la misma razón anterior). Para cada variable y sitio, se realizó análisis de varianza, mediante el paquete estadístico SAS v.8e (SAS Institute Inc., Cary, NC) y para comparar las medias de los tratamientos, se aplicó el método de la Diferencia Mínima Significativa, sólo cuando la prueba de F del análisis de varianza indicó diferencias significativas. En todas las pruebas, se utilizó un nivel de significancia de 0,05 y 0,01.

Cuadro 1. Nombre y pedigrí de los doce genotipos de cebada evaluados en Duitama y Samacá, segundo semestre de 2009.

Genotipos	Nombre y Pedigrí	Tipo de grano
<b>Espiga de dos carreras</b>		
1	Tropical 1	Cubierto
2	Metcalfe	Cubierto
3	COMINO/3/MATICO/JET//SHYRI/4/ALELI/5/BICHY2000/6/ GOB/HUMAI10/3/MPYT169.1Y/LAUREL//OLMO/4/CANELA CBSS00Y00309T-C-7Y-3M-0Y	Cubierto
4	CORI"S"//ALELI/MORA CMB90-867-E-1Y-6B-0Y	Desnudo
5	MOLA/SHYRI//ARUPO"S"*2/JET CMB90-867-E-1Y-6B-0Y-3	Desnudo
6	CHINIA/HB.602/3/MOLA/SHYRI//ARUPO"S"*2/JET CMB93.473-E-4Y-4M-0Y	Desnudo
<b>Espiga de seis carreras</b>		
7	"Andina"	Cubierto
8	"128"	Cubierto
9	PM3 x POLA S11-40(1-2)T-7T	Cubierto
10	LIGNEE640/PII382798//DC-B/3/MOLA/4/LINO CMB93.814-A-8Y-1M-0Y	Desnudo
11	GLORIA-BAR/COME//ESPERANZA/3/PENCO/ CHEVRON-BAR/4/CABUYA CBSS99M00459T-C-1M-2Y-1M-0Y	Desnudo
12	GLORIA-BAR/COME//LIGNEE640/3/S.P-B/4/SLLO/5/ SEN/6/TOCTE/7/PETUNIA1/8/CHAMICO/TOCTE//CONGONA CMBS99M00410T-E-9M-1Y-1M-0Y	Desnudo

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En las tablas 1 y 2, se registran los cuadrados medios y el nivel de significancia de las características: número de macollas efectivas por planta, número de granos por espiga y peso de 1.000 granos en las dos localidades. En el municipio de Samacá, el rendimiento de grano no pudo ser determinado, debido a baja población de plantas en las parcelas por el intenso verano, que no permitió aplicar el número de riegos adecuado.

Número de macollas efectivas por planta: Los análisis de varianza (Tablas 1 y 2), indican que el número de carreras, el tipo de grano y la interacción de número de carreras por tipo de grano no presentaron efecto significativo sobre este componente en Duitama, mientras que en Samacá (Tabla 2) sólo mostró efecto significativo el número de carreras. En efecto, en Samacá las cebadas de dos carreras registraron mayor número de macollas con respecto a las de seis, cuya diferencia de 0,44 fue altamente significativa (Tabla 3), lo cual, concuerda con lo reportado por Rasmusson (1985) y con García del Moral *et al.* (2003), en cuanto a que la cebada de

Tabla 1. Cuadrados medios y nivel de significancia para el rendimiento y sus componentes, Duitama, segundo semestre de 2009.

FUENTE DE VARIACIÓN	GRADOS DE LIBERTAD	NÚMERO DE MACOLLAS EFECT./PLANTA	NÚMERO DE GRANOS POR ESPIGA	PESO DE 1.000 GRANOS (G)	RENDIMIENTO (G/PARCELA)
Bloque	3	0,4789	9,8550	4,0964	138.984,71
Número de carreras (C)	1	0,0156	3757,6900**	127,8595**	259.707,45
Error A	3	0,1289	8,3517	1,7576	27.428,68
Tipo de grano (T)	1	0,0306	169,0000**	29,7298*	5.486,36
C x T	1	0,0006	153,7600**	0,0885	238.505,26
Error B	6	0,2973	2,9767	3,3919	48.572,47

\*, \*\*. Significativo a los niveles del 5 y 1%, respectivamente.

Tabla 2. Cuadrados medios y nivel de significancia para el rendimiento y sus componentes, Samacá, segundo semestre de 2009.

FUENTE DE VARIACIÓN	GRADOS DE LIBERTAD	NÚMERO DE MACOLLAS EFECTIVAS/PLANTA	NÚMERO DE GRANOS POR ESPIGA	PESO DE 1.000 GRANOS (G)
Bloque	3	0,2825	22,8250	0,0056
Número de carreras (C)	1	0,8100*	1660,5625**	0,1385**
Error A	3	0,0300	27,4742	0,0033
Tipo de grano (T)	1	0,1600	0,0400	0,0008
C x T	1	0,0225	9,9225	0,0071
Error B	6	0,1479	7,5096	0,0021

\*, \*\*. Significativo a los niveles del 5 y 1%, respectivamente.

seis carreras presentó una tasa de macollamiento reducida, incluso, bajo condiciones favorables de crecimiento, en comparación con la de dos carreras. Asociación positiva entre el número de espigas o macollas efectivas y el rendimiento de grano ha sido encontrada por Castañeda-Saucedo *et al.* (2009), Rasmusson (1985) y Barriga (1974). Para estos últimos autores es el componente de mayor influencia en el rendimiento.

Número de granos por espiga: El número de carreras, el tipo de grano y la interacción entre ellos, mostraron efecto significativo ( $p < 0.001$ ) sobre este componente, en el municipio de Duitama (Tabla 1). En Samacá, solo mostró efecto significativo ( $p < 0.001$ ) el número de carreras (Tabla 2). En efecto, en las dos localidades, las cebadas de seis carreras mostraron un mayor número de granos por espiga que las de dos carreras. Las diferencias en cada localidad de 29,37 y 20,22 fueron altamente significativas (Tabla 3); esto

Tabla 3. Promedio de número de macollas efectivas por planta, número de granos por espiga y peso de 1.000 granos (G), para cebadas diferenciadas por el número de carreras, Duitama y Samacá, segundo semestre de 2009.

NÚMERO DE CARRERAS	NÚMERO DE MACOLLAS EFECTIVAS		NÚMERO DE GRANOS POR ESPIGA		PESO DE 1.000 GRANOS (G)	
	Duitama	Samacá	Duitama	Samacá	Duitama	Samacá
Dos	3,26	3,30	23,16	16,85	46,80	46,20
Seis	3,18	2,86	52,53	37,07	41,43	38,50
<b>Diferencia</b>	0,08 NS	0,44 **	29,37 **	20,22 **	5,37**	7,70**

NS, \*, \*\*: No significativo y diferencias significativas al nivel del 5 y 1%, respectivamente, de acuerdo con la prueba DMS.

coincide con lo reportado por Kjaer & Jensen (1996) y por García del Moral *et al.* (2003), quienes hallaron resultados similares en evaluación de estos dos tipos de cebadas. Lo anterior es debido a que las cebadas de seis carreras presentan mayor número de espiguillas formadas (tres), en comparación con las de dos carreras, en las que solo se aprecia desarrollada la espiguilla intermedia, mientras abortan las laterales. Las cebadas de grano desnudo en Duitama dieron un mayor número de granos por espiga que las cebadas de grano cubierto; la diferencia de 2,82 granos por espiga fue significativa (Tabla 4).

En cuanto a la interacción altamente significativa del número de carreras por el tipo de grano en Duitama (Tabla 1), al estudiar las comparaciones pertinentes (Tabla 5), se encontró lo siguiente, considerando el Número de Carreras: el número de granos por espiga en las cebadas de dos carreras no mostró diferencias significativas, debido al tipo de grano cubierto o desnudo, pero sí en las cebadas de seis carreras, con diferencias altamente significativas, a favor del grano desnudo. Según Bothmer & Jacobsen (1985), como las cebadas cubiertas dieron origen a las desnudas, la masa final de la espiga estaba programada genéticamente

Tabla 4. Promedio de número de granos por espiga y peso de 1.000 granos para cebadas diferenciadas por la persistencia de las glumillas, Duitama, segundo semestre de 2009.

TIPO DE GRANO	NÚMERO DE GRANOS POR ESPIGA	PESO DE 1.000 GRANOS (G)
Cubierto	35,23	45,33
Desnudo	38,05	43,18
<b>Diferencia</b>	2,82*	2,15*

\*, \*\*. Diferencias significativas al nivel del 5 y 1%, respectivamente, de acuerdo con la prueba DMS.

para ser la misma en ambos tipos, pero con la evolución, las de dos carreras emplearon la energía no utilizada en la formación de las glumillas, para formar un mayor número de granos. Mientras tanto, considerando el Tipo de Grano: el número de granos por espiga, tanto en las cebadas de grano cubierto como en las cebadas de grano desnudo fue diferente dependiendo del número de carreras de la espiga; las diferencias altamente significativas favorecieron a las cebadas de seis carreras; esto en la práctica, parece bastante lógico por el mayor número de flores (espiguillas), fecundadas en estas últimas.

Peso de 1.000 granos: El análisis de varianza para este componente de rendimiento (Tablas 2 y 3) mostró diferencias altamente significativas para número de carreras en los dos municipios y significativas para el tipo de grano, exclusivamente, en la localidad de Duitama. En efecto, el peso de 1.000 granos fue mayor, en ambos sitios, en las cebadas de dos carreras, cuyas diferencias de 5,37g (Duitama) y 7,7g (Samacá) fueron altamente significativas (Tabla 4), lo cual, es explicable por la menor competencia por los asimilados en estas últimas cebadas, al tener menor número de granos. Kjaer & Jensen (1996) encontraron resultados similares al

Tabla 5. Promedios de número de granos por espiga para cebadas de dos carreras, de grano desnudo y cubierto y cebadas de seis carreras, de grano desnudo y cubierto, Duitama, segundo semestre de 2009.

Número de carreras	Tipo de grano		Diferencia
	Cubierto	Desnudo	
Dos	22,99	23,33	0,34 NS
Seis	47,46	60,13	12,67**
<b>Diferencia</b>	<b>24,47**</b>	<b>36,80**</b>	

NS, \*, \*\*: No significativo y diferencias significativas al nivel del 5 y 1%, respectivamente, de acuerdo con la prueba DMS.

mencionar que en las variedades de dos carreras el peso de grano fue mayor que en las de seis, pero que estas últimas superaron a las primeras, en el número de granos por espiga.

Gallagher *et al.* (1975) y Rasmusson (1985) plantean que el peso del grano dentro de un grupo determinado de cebadas es un componente de rendimiento de grano bastante estable, porque se produce movilización de los asimilados de reservas del tallo y otros tejidos vegetales, que pueden compensar la carencia de los fotoasimilados corrientes. Por esto, para algunos autores, granos por espiga y espigas por planta tienen un mayor efecto directo en el rendimiento que el peso del grano (Rasmusson, 1985) y, para otros, el efecto de peso del grano en el rendimiento es despreciable o inconsistente (Sinebo, 2002).

Como se expresó anteriormente, la fuente de variación tipo de grano presentó diferencias significativas en Duitama (Tabla 4), siendo más pesados los granos de las cebadas cubiertas, cuya diferencia con los granos de cebadas desnudas, 2,15g, fue significativa al nivel del 5%, lo cual, se debe, en parte, a que este tipo de grano presenta el peso adicional de las glumillas adheridas.

Rendimiento de grano: En el análisis de varianza (Tabla 1), ninguna de las fuentes de variación: número de carreras

de la espiga (C), tipo de grano (T) y la interacción C x T presentó efectos significativos en el rendimiento (g/parcela), en el municipio de Duitama, donde se pudo medir esta característica. En cuanto al número de carreras, se pudo deber a la compensación entre los componentes del rendimiento de grano, algunos mayores y otros menores, en uno u otro tipo, entre las cebadas de dos y seis carreras evaluadas. Estos efectos compensatorios han sido reportados por Mitchell *et al.* (1996) y Sheehy *et al.* (2001), quienes plantean que con frecuencia la utilidad de los componentes del rendimiento, como criterio de selección, se puede ver limitada por los efectos de compensación y que se ha constatado que existe una correlación negativa entre los componentes del rendimiento, de manera que no se puede seleccionar positivamente para todos ellos, al mismo tiempo. Lo más conveniente parece ser lograr el equilibrio entre dichos componentes, mejorando aquel que sea más eficiente en un determinado genotipo, mientras los demás, se mantienen constantes. Similarmente, la compensación entre los componentes del rendimiento en cebada ha sido reportada también por García del Moral *et al.* (1991) y por Conry (1994).

De forma general, se podría concluir que la variable número de carreras por espiga presentó efectos significativos sobre los tres componentes de rendimiento; macollas efectivas por

planta (Samacá), número de granos por espiga (Duitama, Samacá) y peso de 1.000 granos (Duitama, Samacá). Es así como los genotipos con espigas de dos carreras produjeron un mayor número de macollas efectivas (Samacá) y granos más pesados (Duitama, Samacá); no obstante, los genotipos con espigas de seis carreras fueron superiores en cuanto al número de granos por espiga (Duitama, Samacá). El tipo de grano solo presentó los efectos más significativos en el número de granos por espiga y peso del grano: los genotipos de cebada con granos desnudos produjeron mayor número de granos por espiga (Duitama); pero los genotipos con granos cubiertos dieron granos más pesados (Duitama).

La interacción entre el número de carreras de la espiga y el tipo de grano, solo afectó con alta significancia el número de granos por espiga en Duitama. Dentro del número de carreras de la espiga, los genotipos de granos desnudos y cubiertos fueron similares en número de granos en las de dos carreras; pero en las de seis carreras fueron superiores con alta significancia, en número de granos, los genotipos de granos desnudos. Y dentro del tipo de grano, los genotipos de seis carreras sobrepasaron con alta significancia en número de granos a los de dos carreras, tanto en los granos desnudos como en los cubiertos.

El presente trabajo permitió resaltar las características propias de los componentes del rendimiento en cada tipo de cebada, según su número de carreras y tipo de grano, lo cual, será de utilidad para la selección en campo y para orientar las futuras hibridaciones.

Conflictos de intereses: El manuscrito fue preparado y revisado con la participación de todos los autores, quienes declaramos que no existe ningún conflicto de intereses que ponga en riesgo la validez de los resultados presentados.

## BIBLIOGRAFÍA

- ARISNABARRETA, S.; MIRALLES, D.J. 2006. Yield responsiveness in two- and six-rowed barley grown in contrasting nitrogen environments. *J. Agron. Crop Sci.* 192(3): 178-185. Disponible desde Internet en: <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/j.1439-037X.2006.00203.x/full> (con acceso el 20/03/11).
- ATAEI, M. 2006. Path analysis of barley (*Hordeum vulgare* L.) yield. *Tarim Bilimleri Dergisi. Ankara Universitesi Ziraat Fakultesi (Irán)*. 12(3):227-232.
- BARRIGA, P. 1974. Análisis de causa y efecto para rendimiento y componentes del rendimiento en trigo de primavera. *Agro Sur*. 2(1):01-05. Disponible desde Internet en: [http://mingaonline.uach.cl/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0304-88021974000100001&lng=es&nrm=iso](http://mingaonline.uach.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0304-88021974000100001&lng=es&nrm=iso) (con acceso el 10/03/10).
- BOTHMER, R. von; JACOBSEN, N. 1985. Origin, Taxonomy and Related Species. In: Rasmusson, D.C. Ed. *Barley*. American Society of Agronomists, Madison, Wis. p.19-56.
- BUDAK, N. 2000. Heterosis, general and specific combining ability estimates at F1 and F2 generations of 8´8 diallel population in barley. *Turk. J. Field Crops*. 5:61-70.
- CAKIR, M.; POULSEN, D.; GALWEY, N.W.; ABLETT, G.A.; CHALMERS, K.J.; PLATZ, G.J.; PARK, R.F.; LANCE, R.C.M.; PANOZZO, J.F.; READ, B.J.; MOODY, D.B.; BARR, A.R.; JOHNSTON, P.; LI, C.D.; BOYD, W.J.R.; GRIME, C.R.; APPELS, R.; JONES, M.G.K.; LANGRIDGE, P. 2003. Mapping and QTL analysis of the barley population Tallon × Kaputar. *Australian J. Agric. Res.* 54:1155-1162.
- CASTAÑEDA-SAUCEDO, M.C.; LÓPEZ-CASTAÑEDA, C.; COLINAS-DE LEÓN, M.T.; MOLINA, J.; HERNÁNDEZ, A. 2009. Rendimiento y calidad de la semilla de cebada y trigo en campo e invernadero. *Interciencia*. 34(4):286-292. Disponible desde Internet en: [http://www.scielo.org.ve/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0378-18442009000400013&lng=es&nrm=iso](http://www.scielo.org.ve/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0378-18442009000400013&lng=es&nrm=iso). ISSN 0378-1844 (con acceso el 18/02/10).
- CONRY, M.J. 1994. Comparative effect of six cultivars at four rates of nitrogen on the grain yield and grain quality of spring-sown malting barley in Ireland. *J. Agric. Sci.* 122:343-350.
- ESHGHI, R.; AKHUNDOVA, E. 2009. Genetic analysis of grain yield and some agronomic traits in hulless barley. *African J. Agric. Res.* 4(12):1464-1474. Disponible desde Internet en: <http://www.academicjournals.org/AJAR> (con acceso el 18/02/10).
- ESHGHI, R.; OJAGHI, J.; RAHIMI, M.; SALAYEVA, S. 2010. Genetic characteristics of grain yield and its components in barley (*Hordeum vulgare* L.) under normal and drought conditions. *American-Eurasian J. Agric. & Environ. Sci.* 9(5):519-528.
- FENALCE. 2009. Indicadores sectoriales. Febrero 18 de 2009. Disponible desde Internet en: [http://www.fenalce.org/archivos/indicadores%20\\_2009.pdf](http://www.fenalce.org/archivos/indicadores%20_2009.pdf) (con acceso el 15/03/10).

12. GALLAGHER, N.; BISCOE, P.; SCOTT, R. 1975. Barley and its environment. V. Stability of Grain Weight. *J. Appl. Eco.* 12(1):319-336. Disponible desde Internet en: <http://www.jstor.org/stable/2401735> (con acceso el 25/02/10).
13. GARCÍA DEL MORAL, L.F.; RAMOS, J.M.; GARCÍA DEL MORAL, M.B.; JIMÉNEZ-TEJADA, M.P. 1991. Ontogenetic approach to grain production in spring barley based on path-coefficient analysis. *Crop Sci.* 31:1179-1185.
14. GARCÍA DEL MORAL, L.F.; GARCÍA DEL MORAL, M.B.; MOLINA-CANO, J.L.; SLAFER G.A. 2003. Yield stability and development in two- and six-rowed winter barleys under Mediterranean conditions. *Field Crops Res.* 81:109-119.
15. ISLAM, A.A.; DARRAH, M. 2005. Estimation of gene effects for seed yield and component traits in hullless barley. *Turk. J. Field Crops.* 8:85-92.
16. KJAER, B.; JENSEN, J. 1996. Quantitative trait loci for grain yield and yield components in a cross between a six-rowed and a two-rowed barley. *Euphytica.* 90(1):39-48. Disponible desde Internet en: <http://www.springerlink.com/content/u61x267854t51444/fulltext.pdf?page=1> (con acceso el 27/03/10).
17. LI, J.Z.; HUANG, X.Q.; HEINRICH, F.; GANAL, M.W.; RODER, M.S. 2006. Analysis of QTLs for yield components, agronomic traits, and disease resistance in an advanced backcross population of spring barley. *Genome (Canada).* 49:454-466.
18. MITCHELL, J.H.; FUKAI, S.; COOPER, M. 1996. Influence of phenology on grain yield variation among barley cultivars grown under terminal drought. *Australian J. Agric. Res.* 47:757-774.
19. OKUYAMA, L.A.; FEDERIZZI, L.C.; BARBOSA NETO, J.F. 2005. Plant traits to complement selection based on yield components in wheat. *Ciência Rural, Santa Maria. (Brazil).* 35(5):1010-1018.
20. RASMUSSEN, D.C. 1985. Barley. American Society of Agronomy, Crop Science Society of America, Soil Science Society of America. Publishers, Madison, Wisconsin. 522p.
21. RICO, E. 1980. El cultivo de la cebada cervecera en Colombia. *Bavaria S.A.* p.2-4.
22. ROHMAN, M.M.; SULTANA, R.; PODDER, R.; TANJIMUL, A.T.M.; ISLAM, M.K.; ISLAM, M.S. 2006. Nature of gene action in barley (*Hordeum vulgare* L.). *Asian J. Plant. Sci.* 5:170-173.
23. SHEEHY, J.E.; DIONORA, M.J.A.; MITCHELL, P.L. 2001. Spikelet numbers, sink size and potential yield in rice. *Field Crops Res.* 71:77-85.
24. SINEBO, W. 2002. Crop ecology, production & management. Yield relationships of barleys grown in a tropical highland. *Crop Sci.* 42:428-437. Disponible desde Internet en: <http://crop.sci-journals.org/cgi/content/full/42/2/428#TBL1> (con acceso el 12/01/09).
25. SINGH, I.; DASHORA, S.L.; SHARMA, S.N.; SASTRY, E.V.D.; SINGH, I. 1999. Inheritance of some quantitative characters in six-rowed barley. *Indian. J. Genet.* 59:99-101.
26. VERMA, A.K.; VISHWAKARMA, S.R.; SINGH, P.K. 2007. Genetic architecture for yield and quality component traits over two environments in barley (*Hordeum vulgare* L.). *Barley Genet. Newslett.* 37:24-28.

Recibido: Mayo 7 de 2011

Aceptado: Noviembre 3 de 2011

# PROGRAMACIÓN DE RIEGO EN CÍTRICOS EN BASE A SENSORES DE MEDIDA DEL ESTADO HÍDRICO DEL SUELO Y DE LA PLANTA

## IRRIGATION SCHEDULING IN CITRUS BASED ON SOIL AND PLANT WATER STATUS MEASURING SENSORS

Javier Enrique Vélez Sánchez<sup>1</sup>, Diego Sebastiano Intrigliolo<sup>2</sup>, Juan Ramón Castel Sánchez<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Ingeniero Agrícola., Magister en Ciencias Agrarias, Doctor en Mecanización y Tecnología Agraria. Profesor asociado Departamento de Ingeniería Civil e Ingeniería Agrícola. Facultad de Ingeniería. Universidad Nacional de Colombia. Ciudad Universitaria. Bogotá, Colombia. e-mail: jevejezs@unal.edu.co <sup>2</sup> Ingeniero Agrónomo, Doctor en Agronomía. Investigador, Instituto Valenciano de Investigaciones Agrarias IVIA. Apartado oficial 46113 Moncada, (Valencia). España. e-mail: intrigliolo\_die@ivia.gva.es <sup>3</sup> Ingeniero Agrónomo, Master of Science and Macquire University Sidney. Doctor en Agronomía. Investigador adjunto, Instituto Valenciano de Investigaciones Agrarias IVIA. Apartado oficial 46113 Moncada (Valencia). España. e-mail: castel\_jua@gva.es

Rev. U.D.C.A Act. & Div. Cient. 14(2): 65 - 73, 2011

### RESUMEN

Durante el 2004, se realizó un experimento de riego deficitario controlado (RDC) en una parcela de "Clementina de Nules/Citrange carrizo", en Valencia España, en el que se estudiaron tres programaciones de riego diferentes basadas en: i) la planta (dendrómetros) y ii) riego deficitario fijo. Todas ellas, se compararon con un control bien regado durante todo el año, al 100% de la evapotranspiración de un lisímetro de pesada (ETI<sub>lis</sub>), situado en la misma parcela. Los tratamientos diferenciales de riego, se iniciaron tras la caída fisiológica de frutos y su duración coincidió con el periodo de crecimiento más activo del fruto, desde mediados de julio hasta octubre. Durante el resto del año, todos los tratamientos se regaron al 100% de la ETI<sub>lis</sub>. A los tratamientos regados en base a la información de la planta (MCD<sub>1,25</sub> y MCD<sub>1,35</sub>) se les aplicó semanalmente un volumen de agua variable para mantener la máxima contracción diaria del tronco (MCD), en torno al 125 y 135%, respectivamente, de la del control. El tratamiento de riego deficitario sostenido (RD<sub>fijo</sub>) consistió en la aplicación de un 52% ETI<sub>lis</sub> durante el periodo de restricción. Los resultados muestran que en los tratamientos MCD fue posible programar el riego para mantener el MCD relativo en los valores prefijados de 125 y 135%, respectivamente. La producción y el número de frutos por árbol fue significativamente menor ( $p < 0,05$ ) en los tratamientos MCD<sub>1,35</sub> y RD<sub>fijo</sub>, que en el tratamiento control, pero no lo fue en el tratamiento MCD<sub>1,25</sub>. La distribución por calibres y por calidad de fruta no difirió significativamente

( $p < 0,05$ ) del control en ninguno de los tratamientos, a pesar del ahorro de agua obtenido, que osciló entre el 12 y el 19%, en base anual.

Palabras clave: Déficit, irrigación, programación, contracción.

### SUMMARY

An experiment on regulated deficit irrigation (RDI) strategies was performed during 2004 in an orchard of 'Clementina de Nules'/'Citrange carrizo' In Valencia Spain. Three different irrigation scheduling protocols were compared. Two approaches were based on the information derived from the plant and a third one managed on a sustained, fixed deficit application. Deficit irrigated treatments were compared to a well-watered control treatment, irrigated at 100% of a weighting lysimeter evapotranspiration (ETI<sub>lis</sub>) located in the same orchard. Water restrictions were applied during the fruit growth period after June fruit drop, from July to October, and during the rest of the year all treatments were irrigated at 100% ETI<sub>lis</sub>. Irrigation management based on plant measurements consisted of a variable application rate in order to maintain the maximum daily stem contraction close to 125% and 135% of MDS value of control treatment (MDS ratio management). Finally, the third deficit irrigation treatment was irrigated at 52% of ETI<sub>lis</sub> during the whole restriction period. The results show that was possible to schedule irrigation based on MDS information in order to

maintain the MDS ratio respect to the control around the preset values of 125% and 135% respectively. Yield and number of fruit per tree was significantly lower ( $p < 0,05$ ) respect to control the  $RD_{fixed}$  and  $MCD_{1,35}$ , but not in the  $MCD_{1,25}$  treatments. Fruit size distribution and fruit quality in all treatment did not differ significantly ( $p < 0,05$ ) respect to control, despite the water saving achieved, which ranged from 12 to 19%, on an seasonal basis.

Key words: Deficit, irrigation, scheduling, contraction.

## INTRODUCCIÓN

España es el principal país mediterráneo productor de cítricos, con un área total de  $337.008\text{h}^{-1}$  y una producción mundial de mandarinas y de clementinas, de 1.973.800 toneladas, equivalente al 38% del total (FAO, 2008).

El consumo de agua en la agricultura representa el 87% del total mundial y su demanda va en aumento (FAO, 2003). El rápido agotamiento de los recursos hídricos, los altos costos del agua y la energía, la disminución de los precios internacionales de la fruta y la globalización de los mercados, exigen mejoras en la eficiencia de la gestión del riego.

Una de las alternativas para mejorar la utilización del agua en frutales es el riego deficitario controlado (RDC), el cual, se basa en aportes reducidos de agua en periodos determinados y en cubrir las necesidades hídricas durante el resto del ciclo fenológico del árbol (Behboudian & Mills, 1997). González-Altozano & Castel (2003), en Clementina de Nules, determinaron que durante la fase inicial del crecimiento lineal del fruto, se pueden aplicar recortes moderados de riego, sin mermas en la producción ni en la calidad de la fruta.

Al aplicar el RDC es importante evaluar el estado hídrico del suelo y de la planta, para poder controlar y modular el déficit hídrico impuesto (Feres & Goldhamer, 1990). En los últimos años, los avances tecnológicos en electrónica e informática han permitido abaratar la utilización de sensores para monitorizar en tiempo real y en continuo el estado del suelo y de la planta (Leib *et al.* 2003; Cohen *et al.* 2001).

En este sentido, la máxima contracción diaria (MCD), medida con sensores de desplazamiento lineal (LVDT "Linear Variable Differential Transformer"), es un buen indicador del estado hídrico de la planta (Goldhamer & Feres, 2001); sin embargo, dado que la variación diaria del MCD en árboles bien regados depende de las condiciones ambientales (Intrigliolo & Castel, 2004; 2006; Moriana & Feres, 2004; Vélez *et al.* 2007; Ortuño *et al.* 2010), se requiere de una ecuación de referencia, previamente establecida, para la programación del riego, apoyadas en esta variable (Goldhamer & Feres, 2004). Otra estrategia posible es la utilización de árboles bien

regados, situados en la misma parcela, para la obtención de los valores de referencia.

En este trabajo, el objetivo principal ha sido evaluar la posibilidad de una programación del riego, fundadas en mantener el (MCDi/MCD control) en un valor predeterminado. Así, pues, se ha comparado la respuesta agronómica a estrategias de riego, basadas en la medida indirecta del estado hídrico de la planta y de riego deficitario sostenido.

En Colombia, se están iniciando este tipo de estudios en frutales, con el propósito de obtener ahorros significativos en el consumo de agua en especies tropicales y subtropicales, sin afectar la calidad y la producción.

## MATERIALES Y MÉTODOS

El ensayo, se realizó en la finca experimental del Instituto Valenciano de Investigaciones Agrarias (IVIA), situada en Moncada, Valencia, España ( $39^{\circ} 30' \text{N}$ ,  $0^{\circ} 24' \text{E}$ , altitud 68m). La parcela experimental tiene una superficie aproximada de 1ha. Fue plantada en 1985 con Clementina de Nules (*Citrus clementina*, Hort ex Tan), injertada sobre Citrange carrizo (*Citrus sinensis* x *Poncirus trifoliata*, Raf.), al marco de 6 x 3,85m.

El suelo típico de la zona es de textura franco arcillo-arenosa y su profundidad está limitada a unos 60cm, por la presencia de una capa de carbonato cálcico cementada (horizonte petrocálcico). La densidad aparente media de  $1,49 \text{ t m}^{-3}$ . La capacidad de campo y el punto de marchitez permanente son de 27 y 15%, respectivamente.

Los datos climáticos, se obtuvieron de la estación meteorológica del IVIA, de 50 x 15m, con césped regado y ubicada al lado de la parcela. El agua de riego procede de un pozo, con pH 7,3; C.E.  $1,4 \text{ dS/m}$  (a  $25^{\circ}\text{C}$ .) y un contenido medio de cloruro de  $120\text{gm}^{-3}$ . La determinación de la lámina de riego para el tratamiento control, se hizo en base a la evapotranspiración de un lisímetro de pesada (ETlis), de  $16\text{m}^2$  (4 x 4m) y una profundidad de 1,5 m, plantado con un árbol similar al resto de los de la parcela, donde se encuentra ubicado (Castel, 2001). El porcentaje de área sombreada del árbol del lisímetro en julio de 2004 fue de 34,9%.

El diseño experimental utilizado fue de bloques completos al azar, con tres repeticiones por tratamiento (12 parcelas). La parcela elemental estaba formada por 5-6 filas contiguas de seis árboles cada una (con total 30-36 árboles), siendo los 16 árboles interiores centrales, sobre los que se determinó la producción y la calidad de la fruta.

De enero a mediados de julio, todos los tratamientos se regaron al 100% de ETlis y durante el periodo de mediados de julio a fin de temporada del riego (octubre, con la llegada

de las lluvias), se aplicaron los tratamientos diferenciales siguientes:

- **Tratamiento control**, regado durante todo el año, con el 100% ET<sub>lis</sub>.
- **Tratamiento MCD<sub>1,25</sub>**, durante el período del 19 de julio al 10 de octubre, coincidiendo con casi toda la fase de crecimiento del fruto, se regó con dosis variable (en promedio del 67% del control), a fin de mantener la MCD, un 25% por encima de la MCD del control.
- **Tratamiento MCD<sub>1,35</sub>**, durante el mismo periodo, arriba citado, se redujo la dosis de forma variable (en promedio del 59% del control), a fin de mantener la MCD, un 35% por encima de la MCD del control.
- **Tratamiento RD fijo**, regado con una lámina de riego deficitaria fija, correspondiente al 53% del control.

Los árboles, se regaron con un sistema de goteo, con seis goteros por planta de 4l hora<sup>-1</sup> cada uno. El agua aplicada semanalmente, se midió mediante contadores volumétricos. El volumen de agua aplicado a cada tratamiento, se controló variando la duración del riego, manteniendo igual la frecuencia, que osciló entre dos y seis días por semana.

Las prácticas culturales llevadas a cabo fueron las comunes para la zona de cultivo. Mediante el sistema de riego, se hizo la aplicación de los fertilizantes una vez por semana desde abril a octubre, las cantidades aplicadas fueron 63, 60 y 100 kg.ha<sup>-1</sup>.año<sup>-1</sup> de N, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> y K<sub>2</sub>O, respectivamente.

**Medida del estado hídrico del suelo y la planta:** El contenido de humedad del suelo (θ<sub>g</sub>), se determinó gravimétricamente seis veces durante el ensayo, en nueve muestras alteradas por parcela experimental, tomadas en las proximidades del bulbo a 25cm de profundidad.

El potencial matricial del suelo (Ψ<sub>s</sub>), se midió continuamente con ocho sensores de matriz granular (Watermark Mod. 200ss Irrrometer Co.) por tratamiento, instalados, a 30cm de profundidad, separados a 25cm del emisor y de la línea de goteo. Las ecuaciones de calibrado utilizadas para convertir los valores de resistencia eléctrica medida con los sensores a valores de potencial matricial del suelo fueron calculadas mediante pruebas de laboratorio y comprobadas con las propuestas por Allen (2000).

El potencial hídrico foliar, se midió con cámara de presión (mod. 5100 a, Soil Moisture Equip. Corp. USA). Se hicieron medidas en hojas antes del amanecer (Ψ<sub>a</sub>) y, a medio día solar, en hojas cubiertas dos horas antes con bolsas de plástico de cierre hermético, recubiertas de papel de aluminio (Ψ<sub>t</sub>). Tanto para Ψ<sub>a</sub> como para Ψ<sub>t</sub>, se utilizaron tres hojas por árbol, en cuatro árboles representativos por tratamiento. Las determinaciones, se realizaron al comienzo de las restricciones y, posteriormente, cada mes para Ψ<sub>a</sub> y cada 15 días para Ψ<sub>t</sub>.

**Variaciones del diámetro de los troncos:** Se realizaron medidas continuas de las variaciones del diámetro del tronco con sensores de desplazamiento lineal (LVDT, Schlumberger Mod. DF-2,5), en cuatro árboles por tratamiento, MCD<sub>1,25</sub>, MCD<sub>1,35</sub>, RD<sub>fijo</sub> y Control. En cada tronco, se instaló un sensor por encima del injerto, a unos 20cm del suelo en la parte norte de cada árbol, mediante porta sensores construidos de invar, una aleación con un coeficiente térmico de dilatación mínimo. A partir de las medidas de la variación del diámetro del tronco, se calculó la máxima contracción diaria (MCD), como diferencia entre el máximo y el mínimo diámetro alcanzado por el tronco cada día, según Goldhamer & Fereres (2001). La toma de datos de los sensores - LVDT y Watermark, se automatizó mediante equipo de adquisición de datos y multiplexor (CR10x+ (AM25T y AM416)) de Campbell Scientific Inc.

**Determinación de la producción:** Se llevó a cabo mediante la recolección comercial de la cosecha en los diez árboles de cada parcela. Del total de producción, se tomaron al azar diez cajas de 20 kg de cada parcela y se determinó la distribución de calibres por peso, mediante una calibradora (Fomesa SA). Los análisis de calidad de fruta, incluyendo porcentaje de corteza, porcentaje de zumo, porcentaje de pulpa, azúcares solubles totales (°Brix), acidez total e índice de madurez, se realizaron en muestras de 50 frutos, por parcela experimental. El índice de madurez, se calculó como (Sólidos solubles totales): (Acidez)\*10.

**Análisis estadístico:** El análisis estadístico, se llevó a cabo mediante análisis de varianza y el test de Dunnett, para comparaciones de los distintos tratamientos frente al control. Para ello, se aplicó el procedimiento 'glm', del programa SAS/STAT (SAS Institute Inc., 1994).

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

**Volúmenes de agua aplicada:** Durante el periodo de restricción de riego la precipitación total (P) fue 99mm, la evapotranspiración (ET<sub>o</sub>), calculada mediante la ecuación de Penman-Monteith (Allen *et al.* 1998), fue 324mm y la lámina aplicada mediante el riego 160, 107, 94 y 84 mm para los tratamientos Control, MCD<sub>1,25</sub>, MCD<sub>1,35</sub> y RD<sub>fijo</sub>, respectivamente (Tabla 1). Las reducciones de riego representaron un ahorro de agua anual de 47, 72 y 78mm para el MCD<sub>1,25</sub>, MCD<sub>1,35</sub> y RD<sub>fijo</sub>, respectivamente. Esto equivale a un ahorro relativo de 12, 18 y 19%, respectivamente, e implica un ahorro de 49, 75 y 81 horas de bombeo año<sup>-1</sup> (para seis goteros de 4 l h<sup>-1</sup>), y 51, 78 y 85 Euros ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup> (con una bomba de 1,1 KVA h<sup>-1</sup>, al precio medio de de KVA h<sup>-1</sup> 0,95 Euros KVA h<sup>-1</sup>). La figura 1, muestra el volumen de agua acumulado, aplicado durante el periodo de restricción del día 201 hasta el 284.

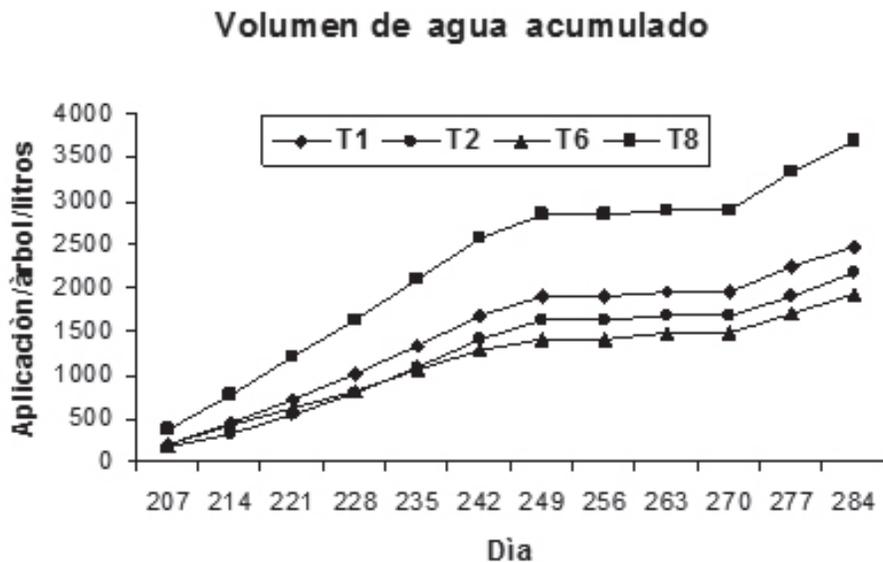


Figura 1. Volumen de agua aplicado en la -1, acumulado durante el período deficitario para los tratamientos T1- MCD1.25, T2- MCD1.35, T6- RD fijo y T8- Control.

Tabla 1. Evapotranspiración potencial (ETo), evapotranspiración del lisímetro (ETlis), precipitación total (P), y agua aplicada en los tratamientos MCD1.25, MCD1.35, RDfijo y Control. Todos los datos expresados en mm.

Periodo	ETo	ET lis	P	Agua aplicada, mm			
				MCD <sub>1.25</sub>	MCD <sub>1.35</sub>	RD <sub>fijo</sub>	Control
1 enero -18 julio (sin restricciones)	581	264	211	166	154	160	161
19 julio - 10 octubre (total deficitario)	324	197	99	107	94	84	160
11 octubre -1 Diciembre (sin restricciones)	86	62	12	80	80	78	79
Total año	991	523	322	353	328	322	400
% de agua aplicada con respecto al Control durante el periodo deficitario				67	59	53	
% de agua aplicada con respecto al Control durante todo el año				88	82	81	

El manejo del riego sobre la base del ratio ( $MCD_{1.25}/MCD_{control}$  y  $MCD_{1.35}/MCD_{control}$ ), en los tratamientos basados en la MCD, dada la variabilidad natural entre árboles antes del inicio de los tratamientos diferenciales de riego, la relación  $MCD_{1.25}/MCD_{control}$  y  $MCD_{1.35}/MCD_{control}$  era de 0,79 y 0,73, respectivamente, por lo que los valores de referencia a mantener equivalían a  $0,79*1,25 = 0,99$  y  $0,73*1,35 = 0,99$ , respectivamente. Incrementando o disminuyendo la cantidad de agua semanal  $\pm$  de un 10 a 20% del Control, en función de la variación observada en el ratio, se intentó mantener el  $MCD_{1.25}$  y  $MCD_{1.35}$  un 25 y 35% por encima del  $MCD_{control}$  y que la evolución se fuera aproximando al umbral prefijado (Figura 2).

La variación observada en el ratio, se consiguió que fuera relativamente estable durante la etapa de riego diferenciado, con ligeras oscilaciones, dependiendo de la cantidad de agua aplicada, aumentando en aquellas semanas en las que se hicieron recortes de agua (semana 35 y 41 en el  $MCD_{1.25}$  y semanas 33 a 36 en el  $MCD_{1.35}$ ) y disminuyendo cuando se aumentó la aplicación de agua (semana 38 para los tratamientos  $MCD_{1.25}$  y  $MCD_{1.35}$ , respectivamente), acercándose al valor umbral durante la mayor parte de la etapa de riego deficitario en los dos tratamientos (Figura 2).

Estos resultados indican que es posible automatizar el riego con base a este parámetro, tratando de mejorar la toma de decisiones acerca de las variaciones de los volúmenes

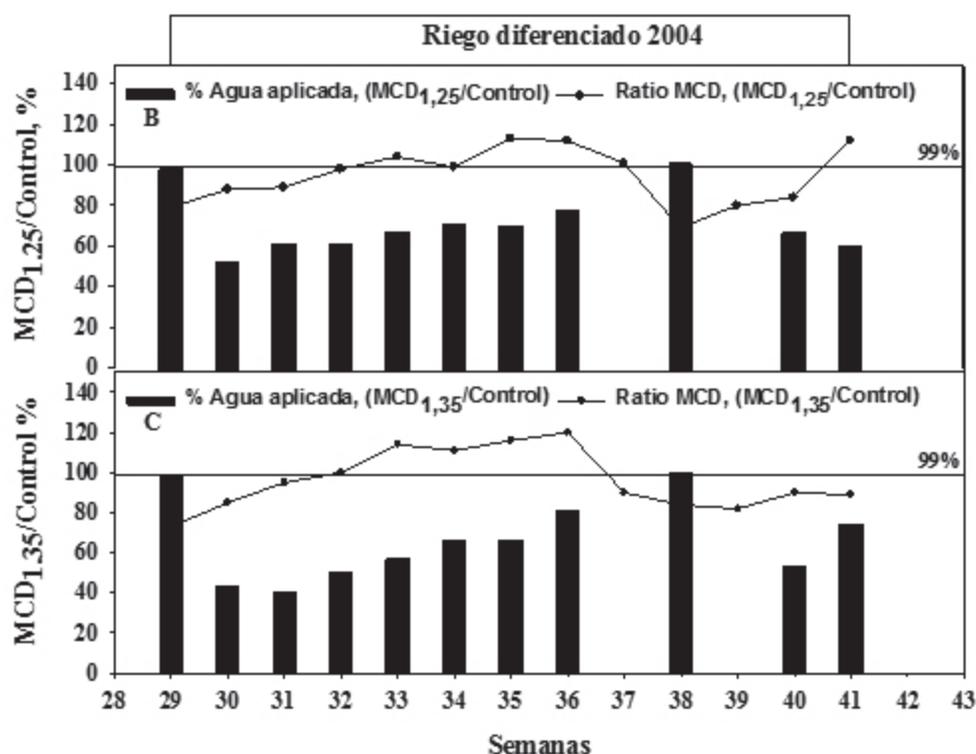


Figura 2. B) la máxima contracción diaria relativa ( $MCD_{1,25} / MCD_{Control}$ ) y el agua aplicada en 2004 y C) la máxima contracción diaria relativa ( $MCD_{1,35} / MCD_{Control}$ ) y el agua aplicada en 2004.

de agua a aplicar semana a semana. La figura 2, muestra que cuando las cantidades de agua aplicadas durante el período de riego diferenciado fueron moderadas, la evolución del ratio  $MCD_{1,25}/MCD_{control}$  y  $MCD_{1,35}/MCD_{control}$  fue más estable. Es aconsejable aumentar el número de sensores por tratamiento en un futuro, para contrarrestar la alta variabilidad observada. De esta manera, se puede controlar, continuamente, el estado hídrico del árbol con mayor precisión, modulando el déficit hídrico impuesto para no alcanzar situaciones de estrés hídrico demasiado severas, que podrían comprometer su productividad. Además, ésta estrategia de riego permite realizar una programación basada en el MCD relativo cuando no se tiene una ecuación de referencia previamente establecida. Disponer de unos árboles de referencia bien regados en la misma parcela, se puede llevar a cabo sin sectorizarla, por ejemplo, instalando emisores de mayor caudal en aquellos árboles que van a emplearse como referencia.

Estas técnicas son aplicables en especies tropicales para la programación del riego, con el propósito de obtener ahorros significativos de agua incrementando la eficiencia de aplicación.

**Relaciones hídricas:** Durante el periodo de restricciones hídricas, la humedad volumétrica media ( $\theta_v$ ) en el tratamiento control fue del 24,8%, cercana a la capacidad de campo (27%), mientras que los tratamientos  $MCD_{1,25}$ ,  $MCD_{1,35}$  y  $RD_{fijo}$  tuvieron una  $\theta_v$  media de 22,0; 21,7 y 22,4%, respectivamente, por encima del valor umbral, cercano a 15% encontrado previamente en este mismo huerto. Así, pues, los árboles de los tratamientos deficitarios  $MCD_{1,25}$ ,  $MCD_{1,35}$  y  $RD_{fijo}$  agotaron en promedio el 42, 44 y 39% de la reserva del suelo, respectivamente, que se recuperaba con las lluvias; no obstante, estos valores son solo aproximados dada la alta variabilidad observada en nuestras medidas de humedad del suelo y, por ello, su relativamente baja precisión.

Aunque los sensores Watermak no respondieron claramente a los ciclos de secado y de humedecimiento, se observa que el  $\Psi_s$  del tratamiento control se mantuvo durante casi todo el ensayo con valores entre -10 y -20 kPa, mientras que en los tratamientos con restricciones el  $\Psi_s$  tuvo una tendencia a disminuir, presentándose el menor valor en el tratamiento  $MCD_{1,25}$ , seguido del  $RD_{fijo}$  y  $MCD_{1,35}$ , respectivamente, el día 271 (Figura 3A). Con la imposición del déficit hídrico, el  $\Psi_a$  y  $\Psi_t$ , tal como era esperable, tendieron a disminuir (Figura 3B y 3C). El  $RD_{fijo}$ , al que se le aplicó la menor lámina (84

mm/periodo), tuvo los menores valores de  $\Psi_a$  (-0,8 MPa) y  $\Psi_t$  (-2,15MPa), después de 25 y 37 días de iniciarse el recorte de agua (días 225 y 238, respectivamente).

Los tratamientos MCD<sub>1,25</sub> y MCD<sub>1,35</sub>, con láminas de 107 y 94 mm/periodo, respectivamente, tuvieron valores similares de  $\Psi_a$ , en torno a -0,53 a -0,70 MPa y entre -0,75 y -1.8 MPa de  $\Psi_t$ , mientras que en el tratamiento control, el Ya

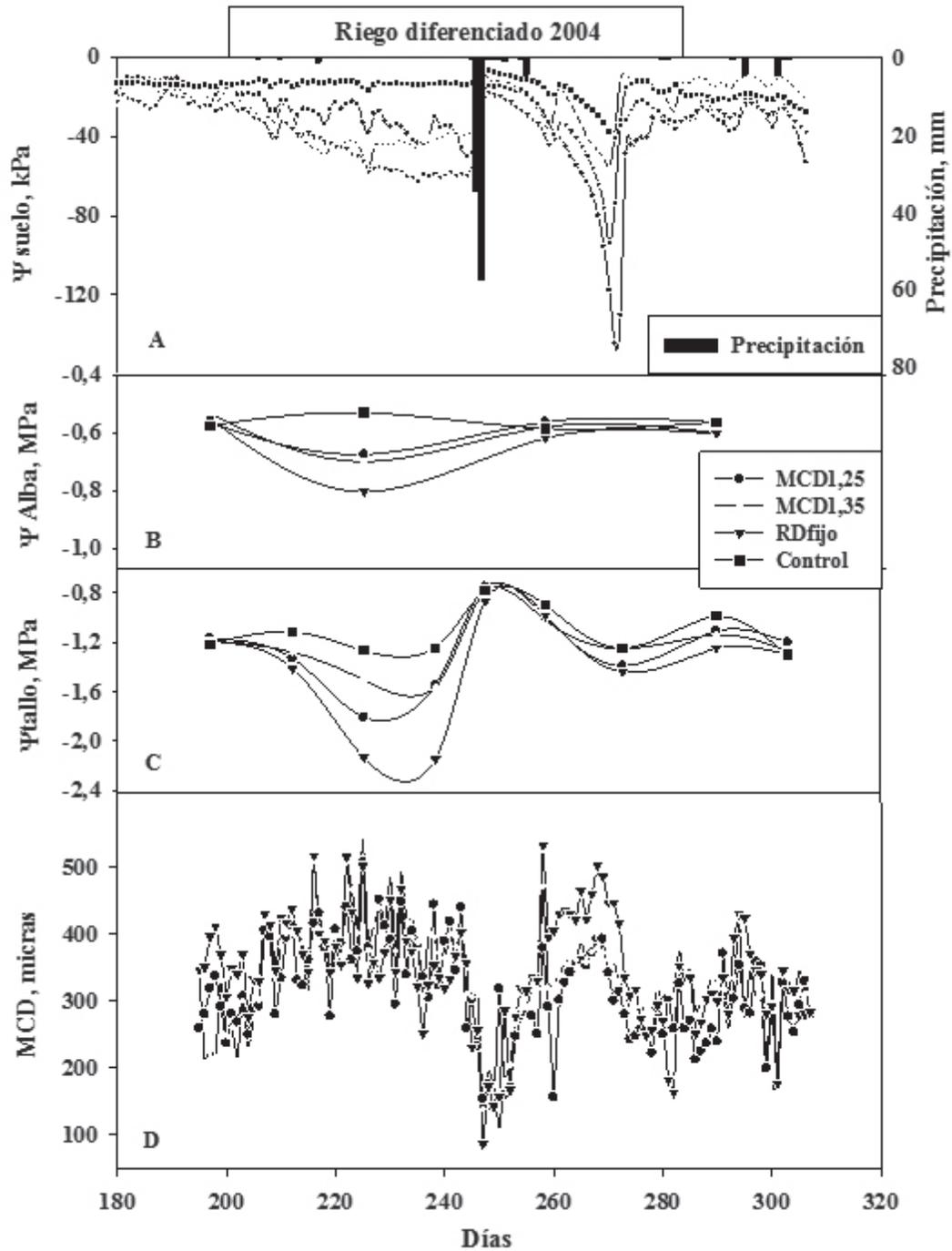


Figura 3. Evolución de los indicadores del estado hídrico del suelo y de la planta en los distintos tratamientos de riego: A)  $\Psi_s$ , los valores mostrados son los tomados a medio día; B)  $\Psi_a$ , alba; C)  $\Psi_t$ , tallo y D) MCD.

osciló entre -0,53 y -0,58 MPa y el  $\Psi_t$  entre -0,78 y -1,27 MPa, a lo largo de la estación. En la evolución de ambos indicadores, se aprecia también la influencia de la lluvia, ya que en los días 246 y 247 cuando la precipitación fue de 34,4 y 57,3mm, respectivamente, los valores de  $\Psi_a$  y  $\Psi_t$  de todos los tratamientos, prácticamente se igualaron. Cabe destacar que los valores mínimos alcanzados de  $\Psi_a$ , incluso en el tratamiento de mayor restricción, son mayores al umbral propuesto durante este periodo (-1,20 MPa), a partir, del cual, el crecimiento del fruto puede ser irreversiblemente afectado (González-Altozano & Castel, 2003).

La MCD está relacionada con el uso de reservas hídricas del tronco y, por tanto, teóricamente debe ser mayor en los árboles con riego deficitario (Huguet *et al.* 1992; Goldhamer *et al.* 1999). El valor de MCD en el tratamiento MCD<sub>1,35</sub> (Figura 3D) fue superior al del control, entre los días 223 y 243 cuando hubo mayores diferencias en  $\Psi_a$  y  $\Psi_t$ . De hecho, antes del comienzo de las restricciones y después las lluvias de los días 246 y 247, cuando todos los tratamientos tenían valores similares de  $\Psi_a$  y  $\Psi_t$ , la MCD, en los tratamiento con restricciones, era igual o incluso menor que la del control.

Producción y calidad: En el tratamiento MCD<sub>1,35</sub> y RD<sub>fijo</sub> la producción y el número de frutos por árbol fue menor significativamente ( $p < 0,05$ ) al tratamiento control, igual a lo encontrado en Ciruelo japonés, por Naor, en 2004 e Intrigliolo & Castel, en 2005 y 2006, pero en el tratamiento MCD<sub>1,25</sub> sin embargo no difirió (Tabla 2).

La distribución por calibres y por calidad de la fruta no difirió significativamente ( $p < 0,05$ ) en ninguno de los tratamientos, a pesar del ahorro de agua obtenido, que osciló entre el 12 y 19%. Esto posiblemente, se debe a que el periodo en el que se impuso el déficit es poco sensible al estrés hídrico (González-Altozano & Castel, 2003). El porcentaje de zumo y de pulpa en el tratamiento control fue significativamente ( $p < 0,05$ ) mayor y menor, respectivamente, a los demás tratamientos. Además, al medir en continuo el estado hídrico de las planta se pudo evitar que el déficit hídrico experimentado fuera severo y, por ello, repercutiera negativamente sobre la calidad.

El índice de madurez de los tratamientos deficitarios fue casi igual al del control, como lo hallado por Hilgeman & Sharp

Tabla 2. Parámetros de producción y de calidad de la fruta en los tratamientos MCD<sub>1,25</sub>, MCD<sub>1,35</sub>, RDfijo y Control. En la columna Prob > t se incluye el nivel de significación estadística del efecto de los tratamientos a partir de la ANOVA. Medias seguidas de la misma letra no difieren significativamente, de acuerdo a la prueba de Dunnett a  $P < 0.05$ .

Parámetro	Tratamiento				Prob > t
	MCD <sub>1,25</sub>	MCD <sub>1,35</sub>	RD <sub>fijo</sub>	Control (100ETIis)	
Producción kg/árbol	60,1 bc	49,8 ab	44,7 b	64,9 c	0,0155
Peso medio fruto, g	84	89	91	93,2	0,7053
Número frutos/árbol	719 c	574 ab	482 a	711 b	0,0387
Sólidos solubles totales, °Brix	13,2	13,3	13,2	12,6	0,3696
Acidez, g l <sup>-1</sup>	11,8	11,7	11,8	11,2	0,3173
Índice madurez	11,2	11,3	11,2	11,3	0,9828
Espesor corteza, mm	2,14 b	2,02 ab	2,09 b	1,90 a	0,0030
% Zumo	28,8 a	29,7 a	29,4 a	32,5 b	0,0471
% Pulpa	49,6 b	49,6 b	50,4 b	46,4 a	0,0285
% Corteza	20,1	20,1	19,5	19,9	0,7100
Densidad zumo, gcm <sup>-3</sup>	1,05	1,05	1,05	1,05	0,5985
% Calibre1(<39g)	1,08	1,1	0,76	0,77	0,5911
% Calibre 2(39-58g)	8,88	8,66	5,5	5,97	0,4630
% Calibre 3(58-85g)	31,16	28,08	22,79	24,93	0,6408
% Calibre 4(85-105g)	27,32	23,99	25,87	26,59	0,5566
% Calibre 5(105-124g)	17,94	17,96	21,99	21,64	0,5210
% Calibre 6(124-160g)	11,22	16,22	18,33	15,78	0,7228
% Calibre 7(160-184g)	1,45	2,94	3,74	2,38	0,6928
% Calibre8 (>184g)	0,95	1,06	1,02	1,94	0,5959

(1970) y Navarro *et al.* (2010). El espesor de la corteza fue un poco mayor en los tratamientos deficitarios y así como éste aumenta, el porcentaje de zumo disminuye. La falta de agua no produjo alteraciones en el fruto, similares a las descritas por Shalhevet & Levy (1990), como el aumento de la relación corteza/pulpa que fue de 0,41; 0,41; 0,39 y 0,43 para MCD<sub>1,25</sub>, MCD<sub>1,35</sub>, RD<sub>fijo</sub> y Control, respectivamente.

En los contenidos de ácidos y de azúcares, se observó un ligero aumento no significativo (Tabla 2) en los tratamientos deficitarios respecto al control, efecto similar al observado por Castel & Buj (1990) y Shalhevet & Levy (1990).

El índice de madurez de los tratamientos deficitarios MCD<sub>1,25</sub> y RD<sub>fijo</sub> fue un poco menor al del tratamiento control, contrario a lo encontrado por Hilgeman & Sharp (1970), mientras que el del tratamiento MCD<sub>1,35</sub> fue igual al del control.

La MCD relativa a un tratamiento control mostró estabilidad y respuesta rápida durante el ensayo, lo que indica la posibilidad de automatizar la programación del riego en base a este parámetro. Así, a pesar de las distintas estrategias llevadas a cabo para la programación del riego no hubo diferencias en la respuesta productiva en el tratamiento MCD<sub>1,25</sub>, consiguiéndose un ahorro de agua de un 33% frente al tratamiento control, durante el periodo deficitario, lo que se traduce, además, en menor consumo de energía, disminución de los costos de producción y, por consiguiente, en un aumento de la rentabilidad, mayor eficiencia en la utilización del agua y disminución de riesgos de contaminación por percolación profunda. En los tratamientos MCD<sub>1,35</sub> y RD<sub>fijo</sub> el ahorro del 41 y 47% respecto al control, durante el periodo deficitario, produjo disminución en la producción pero no mostró diferencia en la calidad del fruto, lo que significa que se debe programar con más exactitud la lamina aplicada semanalmente, para contrarrestar el efecto de la baja producción.

En condiciones limitantes de disponibilidad de agua, regar con dosis deficitarias controladas puede permitir obtener producciones similares a las de un cultivo bien regado, siempre que se realice en el estado fenológico de baja sensibilidad y los límites tolerables de estrés no se superen.

**Conflicto de intereses:** El manuscrito fue preparado y revisado con la participación de todos los autores, quienes declaramos que no existe ningún conflicto de intereses que ponga en riesgo la validez de los resultados presentados.

## BIBLIOGRAFÍA

1. ALLEN, R. 2000. Calibration for the Watermark 200SS soil water potential sensor to fit the 7-19-96 "calibration #3" table from Irrrometer. Univ. Idaho, Kimberley, Idaho, 4p.
2. ALLEN, R.G.; PEREIRA, L.S.; RAES, D.; SMITH, M. 1998. Crop evapotranspiration guidelines for computing crop water requirements. Irrigation and Drainage Paper 56. FAO. Roma. 300p.
3. BEHBOUDIAN, M.H.; MILLS, T.M. 1997. Deficit irrigation in deciduous orchards. Horticultural Reviews. 21:125-131.
4. CASTEL, J.R.; BUJ, A. 1990. Response of Salustiana oranges to high frequency deficit irrigation. Irrig. Sci. 11:121-127.
5. CASTEL, J.R. 2001. Determinación de la evapotranspiración de cítricos mediante lisimetría de pesada. Riegos y Drenajes XXI 56:9-14.
6. COHEN, M.; GOLDHAMER, D.A.; FERERES, E.; GIRONA, J.; MATA, M. 2001. Assessment of peach tree responses to irrigation water deficits by continuous monitoring of trunk diameter changes. J. Hort. Sci. Biotech. 761:55-60.
7. FAO. 2003. Agricultura 21. Enfoques. Revista Gestión Moderna del Riego. Departamento de Agricultura. FAO, Roma. p.1- 2.
8. FAO. 2008. FAOSTAT. Departamento de Agricultura. FAO, Roma.
9. FERERES, E.; GOLDHAMER, D.A. 1990. Deciduous fruit and nut trees. In: Stewart, B.A.; Nielsen, D.R. (eds.) Irrigation of Agricultural Crops. A.S.A. Madison, Wis. Mon.nº 30. p.987-1017.
10. GOLDHAMER, D.A.; FERERES, E.; MATA, M.; GIRONA, J.; COHEN, M. 1999. Sensitivity of continuous and discrete plant and soil water status monitoring in peach trees subjected to deficit irrigation. J. Amer. Soc. Hort. Sci 1244: 437-444.
11. GOLDHAMER, D.A.; FERERES, E. 2001. Irrigation Scheduling protocols using continuously recorded trunk diameter measurements. Irrig. Sci. 20:15-125.

12. GOLDHAMER, D.A.; FERERES, E. 2004. Irrigation scheduling of almond trees with trunk diameter sensors. *Irrig. Sci.* 23(1):11-19.
13. GONZÁLEZ-ALTOZANO, P.; CASTEL, J.R. 2003. Riego deficitario controlado en "Clementina de Nules". I. Efectos sobre la producción y la calidad de la fruta. *Spanish J. Agric. Res.* 1(2):81-92.
14. HILGEMAN, R.H.; SHARP, F.O. 1970. Response of "Valencia" orange trees to four soil water schedules during 20 years. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.* 95: 739-745.
15. HUGUET, J.G.; LI, S.H.; LORENDEAU, J.Y.; PELLOUX, G. 1992. Specific micromorphometric reactions of fruit trees to water stress and irrigation scheduling automation. *J. Hortic. Sci.* 67:631-640.
16. INTRIGLIOLO, D.S.; CASTEL, J.R. 2004. Feasibility of using LVDT and Watermark sensor for irrigation scheduling in plum. *Acta Horticulturae.* 664:317-323.
17. INTRIGLIOLO, D.S.; CASTEL, J.R. 2005. Effects of regulated deficit irrigation on growth and yield of young Japanese plum trees. *J. Hortic. Sci. Biotech.* 80:177-182.
18. INTRIGLIOLO, D.S.; CASTEL, J.R. 2006. Performance of various water stress indicators for prediction of fruit size response to deficit irrigation in plum. *Agric. Water Management.* 83:173-180.
19. LEIB, B.G.; JABRO, J.D.; MATTHEWS, G.R. 2003. Field evaluation and performance comparison of soil moisture sensors. *Soil Sci.* 168(6):396-408.
20. MORIANA, A.; FERERES, E. 2004. Establishing reference values of trunk diameter fluctuations and stem water potential for irrigation scheduling of olive trees. *Acta Horticulturae.* 664:407-412.
21. NAOR, A. 2004. The interaction of soil-and stem-water potential with crop level, fruit size and stomatal conductance of field-grown "Black – Amber" Japanese Plum. *J. Hortic. Sci. Biotech.* 79: 273-280.
22. NAVARRO, J.M.; PÉREZ-PÉREZ, J.G.; ROMERO, P.; BOTÍA, P. 2010. Analysis of the changes in quality in mandarin fruit, produced by deficit irrigation treatments. *Food Chemistry.* 119:1591-1596.
23. ORTUÑO, M.F.; CONEJERO, W.; MORENO, F.; MORIANA, A.; INTRIGLIOLO, D.S.; BIEL, C.; MELLISHO, C.D.; PÉREZ-PASTOR, A.; DOMINGO, R.; RUIZ-SÁNCHEZ, M.C.; CASADESUS, J.; BONANY, J.; TORRECILLAS, A. 2010. Could trunk diameter sensors be used in woody crops for irrigation scheduling? A review of current knowledge and future perspectives. *Agric. Water Management.* 97:1-11.
24. SAS Institute. 1994. SAS/STAT user's guide. SAS Inst. Inc., Cary, N.c., USA.
25. SHALHEVET, J.; LEVY, Y. 1990. Citrus trees. In: Stewart, B.A.; Nielsen, D.R. (eds.). *Irrigation of Agricultural Crops.* A.S.A. Madison, Wis. Mon. n° 30. p.951-986.
26. VÉLEZ, J.E.; INTRIGLIOLO, D.S.; CASTEL, J.R. 2007. Scheduling deficit irrigation of citrus trees with maximum daily trunk shrinkage. *Agric. Water Management.* 90:197-204.

Recibido: Noviembre 2 de 2010

Aceptado: Agosto 3 de 2011

# SEROPREVALENCIA DE LEPTOSPIROSIS CANINA EN UNA COMUNIDAD RURAL DEL MUNICIPIO DE CIÉNAGA DE ORO, CÓRDOBA (COLOMBIA)

## SEROPREVALENCIA OF CANINE LEPTOSPIROSIS IN A RURAL COMMUNITY IN THE MUNICIPALITY OF CIENAGA DE ORO, CÓRDOBA (COLOMBIA)

Leonardo Álvarez<sup>1</sup>, Alfonso Calderón<sup>2</sup>, Virginia Rodríguez<sup>3</sup>, Germán Arrieta<sup>4</sup>

<sup>1</sup> MVZ, M.Sc. Clínica Veterinaria Julio E Cuervo. Docente Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia. Universidad de Córdoba. Sede Berástegui. e-mail: leofalar@hotmail.com <sup>2</sup> MVZ, M.Sc. Instituto de Investigaciones Biológicas del Trópico (IIBT). Docente Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia. Universidad de Córdoba. Salud Pública y Auditoria en Salud. Corporación Universitaria del Caribe, Sincelejo. e-mail: alcaran1@yahoo.com <sup>3</sup> Bacteriologa, M.Sc. IIBT. Docente Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia. Universidad de Córdoba. Salud Pública y Auditoria en Salud. Corporación Universitaria del Caribe, Sincelejo. e-mail: consuelorr1@yahoo.com <sup>4</sup> Microbiólogo M.Sc. Instituto de Investigaciones Biológicas del Trópico (IIBT). Salud Pública y Auditoria en Salud. Corporación Universitaria del Caribe, Sincelejo. e-mail: arrietaager@yahoo.com

Rev. U.D.C.A Act. & Div. Cient. 14(2): 75 - 81, 2011

### RESUMEN

La leptospirosis representa un problema con implicaciones en salud pública. En los caninos es una enfermedad no siempre diagnosticada, a pesar de su difusión y el rol que desempeñan éstos como reservorios de leptospiras patógenas, convirtiéndose en una importante fuente de infección hacia el humano y otras especies de interés zootécnico. Se hace necesario estudiar la epidemiología de la leptospirosis en la especie canina, para contribuir al diseño de estrategias de prevención y de control. Para determinar la seroprevalencia de *Leptospira interrogans* y los serovares más frecuentes, se adelantó un estudio epidemiológico transversal que incluyó una muestra de 70, caninos mayores de cuatro meses, existentes en la comunidad rural del corregimiento de Berástegui, municipio de Ciénaga de Oro (Córdoba) y por medio de la aglutinación microscópica (MAT,) implementado con 14 serovares. Se consideró un suero positivo cuando se observó aglutinación del 50%, en una dilución  $\geq 1:100$ . La seroprevalencia de leptospirosis en la población canina fue del 47,14% y la mayor frecuencia fue para los serovares *grippotyphosa*, con el 37,14%, seguido de *icterohaemorrhagiae* y *pomona*, con el 34,29 y 25,71%, respectivamente. Al discriminar la seroprevalencia por el número de serovares, se encontró que el 10,01% de las infecciones ocurrió por un sólo serovar; el 5,72%, por dos; el 4,24%, por tres y el 27,17%, por cuatro o más serovares. Los patrones de coaglutinación más frecuentes fueron *icterohaemorrhagiae*-*grippotyphosa*. La mayor

seropositividad, se determinó en los machos, por ser este el mayor grupo muestreado en la población canina evaluada. Estos resultados sugieren que la población canina puede ser un posible reservorio de leptospirosis en la zona de estudio; es necesario ejecutar estudios que permitan el aislamiento y la tipificación de los serovares prevalentes en esta región.

Palabras clave: Caninos, leptospirosis, serovares.

### SUMMARY

Leptospirosis is a problem with public health implications. In dogs the disease is not always diagnosed, despite its diffusion and the role that the canines have as reservoirs of pathogenic leptospiras, becoming an important source of infections for humans and species of zootechnical interest. It is necessary to study the epidemiology of canine leptospirosis in order to design strategies for prevention and control. To determine the seroprevalence of *Leptospira interrogans* and the most frequent serovars, an advanced cross sectional epidemiological study was carried out. Samples of 70 dogs over four months in the rural community of Berástegui township, municipality of Ciénaga de Oro, Córdoba, were analyzed through MAT with 14 serovars. A serum was considered positive with 50% of agglutination at a dilution  $\geq 1:100$ . Seroprevalence of leptospirosis in the dog population was 47.14% and the highest frequency was for serovar *grippotyphosa* with 37.14%, followed by *icterohaemorrhagiae* and *pomona* with 34.29% and 25.71%

respectively. Seroprevalence, discriminated by the number of serotypes, was found in 10.01% of the infections that occurred by a single serovar, 5.72% for two, 4.24% for three and 27.17% for four or more serovars. A most frequent coagglutination pattern was *grippotyphosa-icterohaemorrhagiae*. The highest seroprevalences was found in males since it was the largest group in the canine population tested. These results suggest that the canine population may be a possible reservoir of leptospirosis in the studied area. It is necessary to conduct studies that permit the isolation and characterization of the serovars prevalent in this region.

Key words: Canine, leptospirosis, serovars

## INTRODUCCIÓN

La leptospirosis es producida por especies patógenas del género *Leptospira*, microorganismos aeróbicos obligadas, flexibles muy finas, helicoidalmente enrolladas y de gran movilidad, que pueden medir de 0,1µm de diámetro y 5 – 24µm de largo por 0,1 a 0,5µm de ancho; viven en asociación con hospederos animales (Faine *et al.* 1999). Las leptospirosis patógenas, se clasificaron dentro de la especie *Leptospira interrogans* y los serovares de vida libre (apatógenos) se incluyeron en la especie *Leptospira biflexa* (McDonough, 2001). La leptospirosis es una antropozoonosis reemergente de distribución mundial (Levett, 2004; Batista *et al.* 2004), y afecta a una amplia variedad de mamíferos domésticos y silvestres, tanto en zonas urbanas como rurales (Faine *et al.* 1999; Adler & de la Pena Moctezuma, 2010).

Los caninos pueden sufrir la enfermedad o ser reservorios y fuente de infección para los humanos, por la eliminación del agente etiológico en la orina (leptospiuria) y su estrecho contacto, siendo un factor de riesgo importante para el mantenimiento de la enfermedad. El contacto directo es la vía más importante de transmisión entre los caninos, bien sea por la aspersión de gotas de orina cuando ellos marcan su territorio o al lamer los genitales de sus congéneres (Faine *et al.* 1999; Murhekar *et al.* 1998; Luna *et al.* 2008).

Se define como un animal portador, aquel que mantiene las leptospirosis viables y con capacidad de multiplicarse en sus riñones, excretándolas intermitentemente por la orina (Céspedes, 2005). Esta condición se puede presentar en los caninos durante años, presentando enfermedad clínica con presencia de falla renal o, en forma subclínica, convirtiéndose en fuente de infección para humanos y otros animales (Blazius *et al.* 2005).

Los serovares más importantes que actúan como agente etiológico de leptospirosis canina son *canicola* y *icterohaemorrhagiae* (Jouglard & Brod, 2000; Blazius *et al.* 2005; Jiménez *et al.* 2008). El canino, se puede convertir en reservorio principal (McDonough, 2001), ya que el

agente se aloja en los riñones, pudiéndose excretar por largos períodos y convirtiéndose en un riesgo de infección, tanto para humanos como para otros animales domésticos (Moore *et al.* 2006; Blazius *et al.* 2005; Fontaine, 2006). La leptospirosis en los caninos varía dependiendo de la edad, de la respuesta inmune y del serovar implicado, entre otros factores (Faine *et al.* 1999). Debido a las manifestaciones clínicas es conveniente describir la sinología producida por el serovar, *canicola* no icterogénica e *icterohaemorrhagiae*, que es icterogénica (Luna *et al.* 2008).

La enfermedad por el serovar *canicola* produce anorexia, polidipsia, emesis, deshidratación, miositis, dolor sublumbar, paresia del tren posterior, inflamación muscular, meníngea, estupor, somnolencia, caquexia fiebre o hipotermia progresiva y daño renal, como nefritis, nefrosis o esclerosis renal. La serovariedad *icterohaemorrhagiae* origina un cuadro icterico grave, aumento transitorio de la temperatura corporal, anorexia, polidipsia, emesis, deshidratación, hemorragias petequiales o equimóticas en conjuntiva y cavidad oral, úlceras, halitosis oral, dolor abdominal con constipación inicial, mucorrea o mixorrea, melena, trastornos respiratorios, rara vez se torna crónica y la muerte se presenta a los 4 ó 5 días de iniciados los signos; esta serovariedad afecta el hígado, produciendo acumulación de pigmentos biliares en los canalículos y ductos hepáticos y el grado de ictericia está relacionado con el nivel de obstrucción (Hartman, 1984; Birnbaum *et al.* 1998; Harkin *et al.* 2003).

En Norteamérica la leptospirosis canina es producida por los serovares *pomona*, *grippotyphosa* y *bratislava*; la signología clínica de los serovares *pomona*, *grippotyphosa* y *bratislava* son menos intensos que los descritos anteriormente (Faine *et al.* 1999).

La transmisión hacia los humanos, se produce por contacto directo con orina, con sangre o con órganos de animales contaminados o, indirectamente, por exposición con el ambiente con leptospirosis, como suelos anegadizos y aguas (Adagio *et al.* 2000). En el hombre, se puede manifestar como una enfermedad inaparente e inespecífica y evolucionar hasta una forma fatal, como una falla respiratoria (Seijo *et al.* 2002) o daño miocárdico grave (Velasco *et al.* 2009).

El objetivo fue determinar la seropositividad a diferentes serovares de *L. interrogans* en caninos, del corregimiento de Berástegui, en el municipio de Ciénaga de Oro (Córdoba, Colombia).

## MATERIALES Y MÉTODOS

Mediante un muestreo de conveniencia (Martin *et al.* 1997) empleando un estudio epidemiológico transversal, sin importar sexo, raza, ni condiciones socio-económicas de sus propietarios, se tomó una población de 70 caninos,

mayores de cuatro meses, existentes en la zona urbana del corregimiento de Berástegui, que asistieron a una jornada de vacunación contra rabia, realizada en marzo de 2010. A cada persona responsable o propietario de la mascota, se le realizó una encuesta en la que se consignaron datos como: edad, sexo, raza y antecedentes de vacunación y otras enfermedades infecciosas de los caninos.

El corregimiento de Berástegui esta localizado en el municipio de Ciénaga de Oro, situado a 8° 45' de latitud norte y 75° 53' de longitud oeste del meridiano de Greenwich, ubicado en el valle medio del río Sinú, microrregión sabanas de Córdoba y Sucre, con una altitud de 18 msnm y donde predomina el clima sub-húmedo tropical, con una humedad relativa promedio del 75% y la temperatura promedio es de 28°C (Santana, 1999; Pulido *et al.* 2002).

Las muestras de sangre, se tomaron por punción de la vena cefálica o yugular, obteniendo 5mL en tubos estériles al vacío sin anticoagulante, previamente rotulados. Se transportaron en refrigeración al Instituto de Investigaciones Biológicas del Trópico (IIBT), de la Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia de la Universidad de Córdoba, donde el suero se obtuvo por centrifugación a 3.500 rpm, durante 5 minutos; una vez obtenidos fueron almacenados en tubos eppendorf y congelados a -70°C, para su procesamiento.

Se realizó el diagnóstico, mediante la prueba serológica de aglutinación microscópica (MAT), de acuerdo a las especificaciones del manual de la Sociedad Internacional de Leptospirosis (ILS, 2003); esta prueba aumenta su

confiabilidad en cuanto a más serovares de referencia se utilicen en la reacción. Los sueros, se enfrentaron a una batería de 14 antígenos vivos de serovares de *Leptospira grippotyphosa*, *icterohaemorrhagiae*, *pomona*, *bataviae*, *hardjobovis*, *mini*, *canicola*, *copenhageni*, *autumnalis*, *hardjoprajitmo*, *australis*, *tarassovi*, *zanoni* y *bratislava*. Se consideró como seropositivos a *L. interrogans*, los sueros que presentaron aglutinación igual o superior al 50% de leptospira en una dilución  $\geq 1:100$  para uno o más serovares (Faine *et al.* 1999).

Los datos, se tabularon en una tabla de excel y por medio del programa estadístico SAS versión 8.0, se realizó un análisis estadístico descriptivo para las frecuencias y mediante la prueba de t student, se compararon la seropositividad por sexo, por raza, entre otras características.

El estudio contó con la aprobación del Comité de Ética del IIBT, de la Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia y fue realizado de acuerdo con las normas éticas, determinadas por la ley 84 de 1989 o Estatuto de Protección Animal de la República de Colombia (Congreso de Colombia, 1989).

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La población, se conformó por 39 (55,7%) caninos machos y 31 (49,3%) hembras; el 12,8% (n=9) fueron caninos menores de un año y el 87,14% (n=61) mayores de un año (Tabla 1). Se evidenció que todos los caninos fueron vacunados periódicamente contra la rabia y nunca contra leptospirosis.

Tabla 1. Seropositividad de *Leptospira interrogans*, según la edad en caninos, en el corregimiento de Berástegui, Ciénaga de Oro (Córdoba).

	≤ 1 AÑO		> 1 AÑO		Total	
	n	%	n	%	n	%
Seropositivos	5	7,14	28	40,0	33	47,14
Seronegativos	4	5,71	33	47,14	37	52,86
Total	9	12,85	61	87,14	70	100

El 47,14% (n=33) de los caninos, se determinaron como seropositivos a leptospirosis; estos títulos corresponderían a exposiciones previas y no a reacciones post-vacunales (Faine *et al.* 1999), ya que los antecedentes reportados en los anamnésticos no referenciaron vacunación contra la leptospirosis. Esta seropositividad del 47,14% fue mayor a la de estudios previos en la misma zona, como las reportadas por Navarrete *et al.* (1981), del 27,3%, en caninos urbanos de Montería y Sánchez *et al.* (2010), del 12%, en caninos de áreas rurales de Montería. Esta mayor seropositividad, se

puede explicar por el mayor número de serovares (catorce) empleados en el presente estudio, en comparación con los estudios citados, en los que sólo usaron cuatro serovares; el empleo de una mayor cantidad de antígenos dentro de la batería diagnóstica del MAT, aumenta la probabilidad de identificar un mayor número de seroreactores.

Así mismo, Rodríguez *et al.* (2004), en la ciudad de Cali, determinaron una seroprevalencia del 41,1%, en caninos callejeros, usando siete serovares, muy similar a la hallada

en el presente estudio. Seroprevalencias menores han sido reportados en diferentes regiones de Colombia; por ejemplo, Romero & Sánchez (2009), en las zonas urbanas del Tolima, empleando seis serovares, la seroprevalencia fue del 20,2%; Romero *et al.* (2009), en caninos de zonas urbanas de Buenaventura, con 18 serovares, la seroprevalencia encontrada fue del 31%; Romero *et al.* (2010), en caninos de zonas rurales del Tolima, la seroprevalencia determinada fue del 21,4%, empleando seis serovares; Bermúdez *et al.* 2010 reportaron una seroprevalencia del 67,2%, empleando seis serovares, en caninos de tres barrios marginales de la ciudad de Tunja; esta última seroprevalencia es mayor a la reportada en el presente estudio empleándose seis serovares en el diagnóstico del MAT.

La alta seropositividad determinada en el presente estudio (47,14%), se podría deber al contacto permanente de los caninos con otros animales de interés zootécnico (bovinos y porcinos); a las características geoclimáticas de la región, que facilitan la formación de zonas pantanosas (Santana, 1999; Pulido *et al.* 2002) y que favorecen la sobrevivencia de las leptospiros (McDonough, 2001).

Como se mencionó, las condiciones topográficas de zonas planas inundables favorecen la supervivencia de las leptospiros (Faine *et al.* 1999; McDonough, 2001; Céspedes *et al.* 2009), convirtiéndose así, el área del medio y bajo Sinú, en zona potencialmente apta para leptospiros patógenas, como lo propuso Almenteros *et al.* (2004), quienes determinaron una seroprevalencia del 43% en granjas porcinas de la zona media del Sinú; igualmente, Agudelo *et al.* (2007), para el Urabá antioqueño, halló una prevalencia de anticuerpos contra *Leptospira* spp., del 12,5% por inmunofluorescencia indirecta (IFI); región muy similar por las condiciones agroecológicas a la del medio Sinú.

El serovar que presentó la mayor frecuencia fue *grippotyphosa*, con el 37,14% (n=26) fue seguido de *icterohaemorrhagiae*, con el 34,29% (n=24), *pomona*, con el 25,71% (n=18), *bataviae*, con el 21,43% (n=15) y *hardjobovis*, con el 20% (Tabla 2). De los estudios reportados en Colombia sobre leptospirosis en caninos, los serovares más prevalentes han sido: *icterohaemorrhagiae*, *canicola*, *grippotyphosa*, *pomona*, *hardjobovis* y *hardjoprajitmo* (Navarrete *et al.* 1981; Bermúdez *et al.* 2010; Rodríguez *et al.* 2004; Romero & Sánchez, 2009; Pulido *et al.* 2002; Sánchez *et al.* 2010 y Romero *et al.* 2010), respectivamente.

Los serovares *grippotyphosa* y *pomona* son propios de los bovinos y porcinos y han sido considerados como re-emergentes en la leptospirosis canina (Ribotta *et al.* 2000). Los caninos son susceptibles a todos los serovares conocidos de *Leptospira* (Jouglard & Brod, 2000).

El serovar *grippotyphosa* fue uno de los más seroprevalentes en caninos callejeros de la ciudad Cali, con el 47,7%

(Rodríguez *et al.* 2004) y en caninos de las zonas urbanas y rurales del Tolima (Romero *et al.* 2010). Este serovar ha sido asociado a ratas y a roedores (McDonough, 2001). A diferencia con Romero *et al.* (2010), donde los serovares *icterohaemorrhagiae* y *canicola* fueron menos seroprevalentes, debido, posiblemente, a la continua vacunación de poblaciones de caninos en zonas urbanas y rurales del Tolima; en el presente estudio, no existe evidencia de vacunación contra esta enfermedad y es común ver vagar a los caninos por áreas rurales, donde comparten con otros. Estudios en caninos que incluyan los serovares *mini*, *copenhageni* y *zanoni*, no habían sido reportados en Colombia.

Meeyam *et al.* (2006) determinaron que el serovar *bataviae* fue el más seroreactivo y los serovares *mini* y *sejroe*, como el menos seroreactivo en Tailandia. En el actual estudio para el serovar *mini*, se halló una seropositividad del 11,43%. De los catorce serovares empleados en el MAT, sólo el serovar *bratislava* no mostró reacción aglutinante; Sánchez *et al.* (2010) establecieron una seropositividad del 1%, para este serovar y consideraron que esta seroprevalencia no fue representativa.

Cuando se discriminó la seroprevalencia por el número de serovares, se observó que el 10,01% (n=7) de las infecciones se dio por un sólo serovar; el 5,72% (n=4), por dos serovares; el 4,24% (n=3), tres serovares y el 27,17% (n=19), cuatro o más serovares (Tabla 2). El patrón de coaglutinación más frecuente fue *icterohaemorrhagiae* y *grippotyphosa*. Este patrón de coaglutinación fue diferente al reportado por Rodríguez *et al.* (2004), donde hallaron los serovares *canicola* – *grippotyphosa*. Estas reacciones cruzadas entre serovares han sido ampliamente reconocidas y se explican por la presencia de antígenos compartidos entre serovares y serogrupos (Levett, 2001).

El 7,14% (n=5) de los caninos menores de un año y el 40% (n=28) de los mayores de uno fueron seropositivos (Tabla 1). La mayor seropositividad correspondió al rango de caninos > 1 año; este hallazgo, se puede explicar, ya que este grupo aportó el mayor número de caninos en la población muestreada. Igualmente, la raza no fue un factor importante, puesto que la totalidad de la población evaluada correspondió a caninos mestizos o criollos.

Al comparar los caninos por sexo, se encontró que la seroprevalencia en machos fue del 46,51% y en las hembras del 48,39%, siendo estos dos valores estadísticamente iguales al t-student (P>0.05). A diferencia del presente estudio, Herrer *et al.* (1958) hallaron una seroprevalencia del 50% en machos y del 35,9% para hembras y concluyó que la mayor seroprevalencia en machos se puede deber a que este grupo fue el que aportó el mayor número de individuos, también al hábito que tienen los caninos de lamer los genitales durante el período de celo, donde es mayor el contacto con la orina.

Tabla 2. Distribución por serovar de *Leptospira interrogans*, en el corregimiento de Berástegui, Ciénaga de Oro (Córdoba).

Serovares	Positivos	%	Negativos	%
<i>grippityphosa</i>	26	37,14%	44	62,86%
<i>icterohaemorrhagiae</i>	24	34,29%	46	65,71%
<i>pomona</i>	18	25,71%	52	74,29%
<i>bataviae</i>	15	21,43%	55	78,57%
<i>hardjovovis</i>	14	20,00%	56	80,00%
<i>mini</i>	8	11,43%	62	88,57%
<i>canicola</i>	7	10,00%	63	90,00%
<i>copenhageni</i>	6	8,57%	64	91,43%
<i>autumnales</i>	4	5,71%	66	94,29%
<i>hardjoprajtmo</i>	4	5,71%	66	94,29%
<i>australis</i>	1	1,43%	69	98,57%
<i>tarassovi</i>	1	1,43%	69	98,57%
<i>zanoni</i>	1	1,43%	69	98,57%
<i>bratislava</i>	0	0,00%	70	100,00%

Estos resultados sugieren que las poblaciones caninas pueden ser un posible reservorio de leptospirosis, siendo necesario adelantar estudios seroepidemiológicos, con un mayor número de serovares y tratar de implementar el cultivo bacteriológico, con el fin de tener aislamientos, que permitan identificar las cepas que están circulando entre los caninos y proponer una vacuna que de inmunidad contra todos estos serovares.

**Agradecimientos:** Los autores agradecen al proyecto "Aislamiento de cepas de *Leptospira* spp. en explotaciones porcinas y en aguas asociadas a las porquerizas, en los municipios de Montería, de Cereté y de Ciénaga de Oro", por la financiación. **Conflicto de intereses:** Este manuscrito fue preparado y revisado con la participación de todos los autores, quienes declaramos que no existe ningún conflicto de intereses que pongan en riesgo la validez de los resultados presentados.

## BIBLIOGRAFÍA

- ADLER, B.; DE LA PEÑA MOCTEZUMA, A. 2010. *Leptospira* and leptospirosis. Vet Microbiol. 140, 287-296
- ADAGIO, L.; D'AMICO, G.; WHEELER, J.T; LATTANZI, D.; HAGGE, M.; HIERRO, J.; SOMOZA, J.; TORIBIO, M.; ÁLVAREZ, E. 2000. Estudio preliminar serológico de Leptospirosis Canina y Humana en la ciudad de General Pico y zona de influencia. Ciencia Veterinaria. 2:5-11.
- AGUDELO, F.P; RESTREPO, J.B.N.; ARBOLEDA, N.M. 2007. Situación de la leptospirosis en el Urabá antioqueño colombiano: estudio seroepidemiológico y factores de riesgo en población general urbana. Cad. Saúde Pública. 23(9):2094-2102.
- ALMENTEROS, C.; ARRIETA, G.; MÁTTAR, S.; BARGUIL, A.; TAMAYO, L.; PADILLA, T.; BEDOYA, Z.; MENDOZA, S.; ESTERETA, F.; DÍAZ, N.; MEDINA, A.; RODRÍGUEZ, A.; DE LA OSSA, M.; PÉREZ, A.; RÍOS, R. 2004. Seroprevalencia de leptospirosis porcina en el departamento de Córdoba. Rev. Col. Cienc. Pec. 17:141-147.
- BATISTA, C.S.A.; AZEVEDO, S.S.; ALVES, C.J.; VASCONCELLOS, S.A.; MORAIS, Z.M.; CLEMENTINO, I.J.; LIMA, S.F.; NETO, A.J.O. 2004. Soroprevalência de leptospirose em cães errantes da cidade de Patos, Estado da Paraíba, Brasil. Braz. J. Vet. Res. Anim. Sci. 41(2):131-136.

6. BERMÚDEZ, C.S.; PULIDO, M.; ANDRADE, R. 2010. Seroprevalencia de *Leptospira* spp. en caninos y humanos de tres barrios de Tunja, Colombia. Rev. MVZ Córdoba. 15(3):2185-2193.
7. BIRNBAUM, N.; BARR, S.C.; CENTER, S.A.; SCHERMERHORN, T.; RANDOLPH, J.F.; SIMPSON, K.W. 1998. Naturally acquired leptospirosis in 36 dogs serological and clinicalpathological features. J. Small Anim. Pract. 39:231-236.
8. BLAZIUS, R.D.; ROMANO, P.R.; BLAZIUIZ, E.M.C.; SILVA, O.S. 2005. Ocorrência de cães errantes seropositivos para *Leptospira* spp. na Cidade de Itapema, Santa Catarina, Brasil. Cad. Saúde Pública 21:1952-1956.
9. CÉSPEDES, M. 2005. Leptospirosis: enfermedad zoonótica reemergente. Rev. Perú Med. Exp. Salud Pública. 4:290-307.
10. CÉSPEDES, M.; TAPIA, R.; BALDA, L.; GONZÁLEZ, D.; GLENNY, M.; VINETZ, J.M. 2009. Brote de leptospirosis asociado a la natación en una zona costera, Lima – Perú. Rev. Perú. Med. Exp. Salud Pública 26(4):41-448.
11. CONGRESO DE COLOMBIA. 1989. Estatuto Nacional de Protección Animal. Ley 84 de 1989. Por la cual se adopta el Estatuto Nacional de Protección de los Animales y se crean unas contravenciones y se regula lo referente a su procedimiento y competencia. Disponible desde Internet en: <http://spac-05.tripod.com/id24.html> (con acceso 03/03/2011).
12. FAINE, S.; ADLER, B.; BOLIN, C.; PEROLAT, P. 1999. *Leptospira* and Leptospirosis. 2<sup>nd</sup> ed. Med. Sci. Melbourne (Australia). 272p.
13. FONTAINE, G.A. 2006. Canine leptospirosis - do we have a problem? fuente de agua subterránea en una zona costera, Lima, Perú. Rev. Peru Med. Exp. Salud Pública. 26(4):441-48.
14. HARTMAN, E.G. 1984. Epidemiological aspects of canine leptospirosis in the Netherlands. Zentralbl. Bakteriol. Mikrobiol. Hyg. A. 258(2-3):350-359.
15. HARKIN, K.R.; ROSHTO Y.M.; SULLIVAN, J.T. 2003. Clinical application of a polymerase chain reaction assay for diagnosis of leptospirosis in dogs. J. Am. Vet. Med. Assoc. 222(9):1224-1229.
16. HERRER, A.; LICERAS, J.; MENESES, O. 1958. Leptospirosis en el Perú. Identificación de las cepas de *leptospira* presentes en el perro y el gato e incidencias de la infección. Rev. Méd. Exp. 12:65-86.
17. INTERNACIONAL LEPTOSPIROSIS SOCIETY ILS. 2003. Human leptospirosis guidance for diagnosis surveillance and control. World health organization. Malta. 109p.
18. JIMÉNEZ-COELLO, M.; VADO-SOLIS, I.; CÁRDENAS-MARRUFO, M.F.; RODRÍGUEZ-BUENFIL, J.C.; ORTEGA-PACHECO, A. 2008. Serological survey of canine leptospirosis in the tropics of Yucatan Mexico using two different tests. Acta Trop. 106:22-26.
19. JOUGLARD, S.D.D.; BROD, C.S. 2000. Leptospirosis en cães prevalence e factores de risco no meio rural do municipio de Pelotas, RS. Arq. Inst. Biol S. São Paulo. 67(2):181-185.
20. LEVETT, P.N. 2004. Leptospirosis: A forgotten zoonosis? Clin Microbiol Rev. 4:435-448.
21. LEVETT, P.N. 2001. Leptospirosis. Clinical Microbiology Review (USA). 14(2):296-326.
22. LUNA, A.M.A.; MOLES, C.L.P.; GAVALDÓN, R.D.; NAVA, V.C.; SALAZAR, G.F. 2008. Leptospirosis canina y su problemática en México. Rev. Salud Anim. 30(1):1-11.
23. MARTIN, S.W.; MEEK, A.H.; WILLEBERG, P. 1997. Epidemiología veterinaria. Principios y métodos. Ed. Acribia. Zaragoza (España). p.321-370.
24. McDONOUGH, P. 2001. Leptospirosis en caninos - estado actual. Department of Population Medicine and Diagnostic Science, Diagnostic Laboratory, College of Veterinary Medicine, Cornell University, New York (USA). Disponible desde internet en: URL:[http://www.ivis.org/advances/infect\\_dis\\_carmichael/mcdonough\\_es/ivis.pdf](http://www.ivis.org/advances/infect_dis_carmichael/mcdonough_es/ivis.pdf) (con acceso (27/06/10).
25. MEEYAM, T.; TABLERK, P.; PETCHANOK, B.; PICHPOL, D.; PADUNGTOOD, P. 2006. Seroprevalence and risk factors associated with leptospirosis in dogs. Southeast Asian J. Trop. Med. Public Health (Bangkok, Thailand). 37(1):148-153.
26. MOORE, F.E.; GUPTILL, L.F.; GLICKMAN, N.W.; CALDANARO, R.J.; AUCOIN, D.; GLICKMAN, L. 2006. Canine leptospirosis, United States 2002-2004. Emerging Infec. Dis. 3:501-503.

27. MURHEKAR, M.U.; SUGUNON, A.P.; VIJAYACHARI, P.; SHARMAS, S. 1998. Risk factors in the transmission of leptospiral infection. *Indian J. Med. Res.* 107:218-223.
28. NAVARRETE, M.; SEJIN, R.; VÉLEZ, P. 1981. Estudio preliminar de leptospirosis en caninos en la ciudad de Montería. *Revista ICA.* 16:165-172.
29. PULIDO, I.; MANDIUS, R.; RIVERO, T.; DUARTE, O. 2002. Atlas de los sistemas de producción bovina. Modulo región Caribe. Plan de modernización tecnológica de la ganadería bovina colombiana. Corpoica. Bogotá.
30. RIBOTTA, M.; HIGGINS, R.; GOTTSCHALK, M.; LALLIER, R. 2000. Development of an indirect enzyme-linked immunoabsorbent assay for the detection of leptospiral antibodies in dogs. *J. Vet. Res. Canada.* 64:32-37.
31. RODRÍGUEZ, A.L.; FERRO, B.E.; VARONA, M.X. 2004. Santafé M. Evidencia de exposición a *Leptospira* en perros callejeros de Cali. *Biomédica.* 24: 291-295.
32. ROMERO, P.M.; SÁNCHEZ, V.J. 2009. Seroprevalencia de la leptospirosis canina de tres municipios del departamento del Tolima, Colombia. *Rev. MVZ Córdoba.* 14:1684-1689.
33. ROMERO, P.M.; SÁNCHEZ, V.J.; HAYEK, L. 2010. Prevalencia de anticuerpos contra *leptospira* en población urbana y canina del departamento del Tolima. *Rev. Salud Pública.* 12(2):268-275.
34. ROMERO, P.M.H.; HERNÁNDEZ, M.A.; QUINTERO, M.M.C. 2009. Seroprevalencia y serotipificación de leptospirosis canina en el municipio de Buenaventura (Valle del Cauca). *Biosalud* 8:71-76.
35. SÁNCHEZ, G.A.E.; BALLUT, P.J.C.; CALDERÓN, R.A.; RODRÍGUEZ, R.V.C. 2010. Seroprevalencia de *Leptospira* spp. en caninos de la zona rural de Montería (Córdoba). *Orinoquia.* 14(2):160-167.
36. SANTANA, V.J. 1999. Diccionario Cultural de Córdoba. Segunda edición. Domus Libri. Bogotá (Colombia). p.285-291.
37. SEJO, A.; COTO, H.; SAN JUAN, J.; VIDELA, J.; DEODATO, B.; CERNIGOI, B.; GARCIA, M.O.; COLLIA, O.; DE BASSADONI, D.; SHTIRBU, R.; OLENCHUK, A.; DORTA, D.E.M.; PARMA, A. 2002. Distres respiratorio debido a hemorragia pulmonar por leptospirosis. *Medicina (Buenos Aires)* 62:135-140.
38. VELASCO, C.O.; RIVAS, S.B.; SORIANO, R.J.; RIVERA, R.H.H. 2009. Daño miocárdico grave por leptospirosis. Informe de un caso fatal en México. *Arch. Cardiol. Mex.* 79(4):268-273

Recibido: Febrero 14 de 2011

Aceptado: Octubre 12 de 2011

# COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS (CFD) AND IT'S USE FOR ANALYSIS OF GAS DISTRIBUTION INSIDE ANIMAL PRODUCTION FACILITIES: A LITERATURE REVIEW

## DINÁMICA DE FLUIDOS COMPUTACIONALES (CFD) Y SU USO PARA ANALIZAR LA DISTRIBUCION DE GASES AL INTERIOR DE INSTALACIONES PECUARIAS: UNA REVISIÓN DE LITERATURA

Flávio Alves Damasceno<sup>1</sup>, Fernando da Costa Baêta<sup>2</sup>, Marcio Arêdes Martins<sup>3</sup>, Jairo Alexander Osorio Saraz<sup>4</sup>,  
Ilda de Fátima Ferreira Tinoco<sup>5</sup>

<sup>1</sup>Ingeniero Agrícola Engineer, PhD student - Universidad Federal de Viçosa - Brazil, flavio.damasceno@ufv.br, <sup>2</sup> Profesor - Universidad Federal de Vicoso - Brazil, baeta@ufv.br, <sup>3</sup> Profesor - Universidad Federal de Vicoso - Brazil, aredes@ufv.br <sup>4</sup> Profesor - Universidad Nacional de Colombia - Sede Medellín, aosorio@unal.edu.co, <sup>5</sup> Profesora Universidad Federal de Vicoso - Brazil, iftinoco@ufv.br

Rev. U.D.C.A Act. & Div. Cient. 14(2): 83 - 93, 2011

### ABSTRACT

Currently, one of the most discussed subjects in commercial livestock production is the emission of gases and temperature distribution, associated to climate change and animal welfare, principally with gas as methane ( $\text{CH}_4$ ) and ammonia ( $\text{NH}_3$ ). Application of computational fluid dynamics (CFD) for predicting the occurrence of these gases, especially in the animal production sector, is becoming increasingly important. Along the years, the versatility, precision and ease of use offered by CFD has caused its greater acceptance by the agricultural and animal engineering community. Therefore, CFD is regularly utilized to solve environmental problems associated to climate control in commercial animal production installations. Due to a better combination between computational simulation in CFD and mathematical modeling, realism of these simulations has become more reliable in recent years. Based on these facts, the goal of this study was to showed the recent studies using commercial Computational Fluid Dynamics (CFD) to determinate the behavior and distributions of gases inside animal production installations, showing the advantages and limitations of the technique.

Key words: Computational models, mass and energy balance, animal production installation

### RESUMEN

Actualmente, uno de los casos de mayor discusión en la producción animal, es la emisión de gases y de distribución de temperatura asociados al cambio climático y al comportamiento animal, principalmente con gases como metano ( $\text{CH}_4$ ) y el amoniacio ( $\text{NH}_3$ ). La aplicación de la dinámica de los fluidos computacionales (CFD) para predecir el comportamiento de esos gases, especialmente en el sector de producción animal, esta comenzando a ganar gran importancia. A lo largo de los años, la versatilidad, precisión y la facilidad de uso ofrecida por el CFD ha tenido una gran aceptación en la comunidad de la Ingeniería Agrícola y pecuaria en general. Por lo tanto, el CFD es regularmente utilizado para solucionar problemas ambientales asociados a control climático en instalaciones comerciales de producción animal. Debido a la mejor combinación entre la simulación computacional con CFD y modelos matemáticos, situaciones reales se han simulado con mayor confiabilidad en los últimos años. Este trabajo ofrece una revisión del estado del arte acerca de la aplicación de la técnica con CFD para determinar el comportamiento y distribución de gases al interior de instalaciones pecuarias, mostrando las ventajas y limitaciones de la técnica.

Palabras clave: Modelos computacionales, balance de masa y energía, instalaciones de producción animal.

## INTRODUCTION

Currently one of the most discussed subjects of commercial animal production is the emission of gases, mainly methane ( $\text{CH}_4$ ) and ammonia ( $\text{NH}_3$ ), associated with environmental and climatic changes. Until recently it was estimated that the annual global emissions totaled 689 million tons of  $\text{CH}_4$  (Moss *et al.* 2000) and 53.6 Mt of  $\text{NH}_3\text{-N}$  (Bouwman *et al.* 1997), where 12.8 Mt of  $\text{NH}_3\text{-N}$  results from cattle manure and according to Watson *et al.* (1992), 80 and 25 million tons of  $\text{CH}_4$  are respectively emitted by enteric fermentation and animal manure.

References on the effects of the gases in animal production installations and its influence on animal health are often related to animal production in countries with temperate climates. In these locations, the constructions are completely closed and the final result of the production environment differs from Brazilian conditions, as well as the climatic factor to be considered (Miragliotta *et al.* 2002; Osorio *et al.* 2009).

According to Baêta & Souza (1997) and Osorio *et al.* (2009), the main air pollutants encountered in installations for animal production are ammonia ( $\text{NH}_3$ ), carbon dioxide ( $\text{CO}_2$ ), carbon monoxide ( $\text{CO}$ ), methane ( $\text{CH}_4$ ), sulfur hydroxide ( $\text{H}_2\text{S}$ ), nitrogen dioxide ( $\text{NO}_2$ ) and dust. Thus, air quality in the animal production systems is directly related to the animals metabolism, liberating heat, moisture and  $\text{CO}_2$  to the atmosphere via respiration, as well as gases resulting from digestion of manure, including  $\text{NH}_3$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{H}_2\text{S}$ , dust and gases from incomplete combustion from the heating system, such as  $\text{CO}$  and  $\text{NO}_2$ .

Within the context of modern animal production, studies have shown that an inadequate production environment is one of the factors which may cause the development of respiratory diseases in birds (Miragliotta *et al.* 2002; Menegali *et al.* 2009) and swine (Nader *et al.* 2002; Sampaio *et al.* 2005; Silveira *et al.* 2009), however, few studies consider air quality in cattle confinements.

Both the microclimate and rate of gas emissions inside the installation are strongly influenced by the ventilation system. Understanding the interdependence between the ventilation system, the climate and the gas emission rate is a pre-requisite for the development of adequate ventilation systems.

Ventilation plays an important role in the renewal of air inside the installation, thus allowing a reduction in heat transfer area, facilitating body heat transfer by convection and evaporation, as well as reducing the excess moisture content and some gases such as  $\text{NH}_3$ ,  $\text{CO}_2$  and  $\text{H}_2\text{S}$  from the internal environment, resultant from the bedding, reparation and

manure, thus avoiding pulmonary diseases (Baêta & Souza, 1997).

According to Mueller & Krause (2007) the development of ventilation projects and heating systems in animal installations is based on heat and mass balances. Thus, different sources of heat and mass inside an installation can be found, such as and animals, floor, wet areas, manure, and others. However, to solve the mass and energy balance equations, information regarding the characteristics of the installation, the animal species, the animal age, the management practices, the desired interior climate conditions and the actual exterior climatic conditions is necessary.

Development of mathematical models and application of computational simulations, based on Computational Fluid Dynamics (CFD) allow a time and cost reduction when developing and adapting these projects.

The models of heat, mass and momentum transfer, based on the CFD models, have been amply utilized in studies for evaluation of the behavior of climatic variables inside both vegetative and animal structures (Bjerg *et al.* 2002; Sun *et al.* 2002; Gebremedhin & Wu, 2003; Prueger *et al.* 2008; Norton *et al.* 2009).

These models permit the reduction in number of experiments and the improvement of installations, based on the validation of experimental data, making them increasingly important in the agricultural industry. This importance has grown significantly after overcoming the principal problems of this tool, such as precision in simulations and lack of equipment with large computational domains which have allowed a greater applicability of this technique in recent years.

Based on these facts, the objective of this study is to provide an overview for the application of Computational Fluid Dynamics (CFD) for studying mass transfer of greenhouse gases inside animal production installations.

## MATERIALS AND METHODS

The objective of this study was done through a literature search of a recently theoretical documents, secondary sources, books, articles and journals, since 1990, thus enabling consolidate information on the theoretical basis and applications about of use of CFD in animal production.

The topics tried in this paper were chosen based on the main uses of the CFD, to improve and design animal facilities, in aspects like ventilation and gas control inside of the structures.

### Mass balance and research methods

Carvalho *et al.* (2008) claimed that in animal production facilities the mass balance of fluids (air + water) which enter (+) and exit (-) each control volume (CV) may be expressed by equation 1 and as can be seen in figure 1, where,  $\dot{m}_{neb}$  is the mass of water applied by misting,  $\dot{m}_{inf}$ ,  $\dot{m}_i$  and  $\dot{m}_s$  are the mass flows of air which infiltrate, enter and exit the installation, respectively; and  $\dot{m}_p$  and  $\dot{m}_d$  are in mass production by the animal and waste respectively

$$\dot{m}_i + \dot{m}_{inf} + \dot{m}_{neb} + \dot{m}_d + \dot{m}_p - \dot{m}_s = 0 \quad (1)$$

Analysis of the mass balance has been amply utilized to study the loss of feeds from livestock installations and manure management systems, through feed and fertilizers

information (Sommer & Dahl, 1999; Garrison *et al.* 2001; Tyrrell, 2001). This review provides important information on all types of animal production systems, especially when evaluating multiple projects whose objective are the reduction of odor and all greenhouse gas emissions. Therefore, when quantifying the different modes of input and output of the installation, the final destination of each nutrient (N and C) can be more easily understood, giving greater importance to the different types of nutrient losses.

Sommer & Dahl (1999) utilized a mass balance to estimate N losses caused by denitrification during composting of the bedding. In this study, all measurements were done in a dynamic chamber, where gas emissions were determined along with leaching of nutrients during composting. Based on their mass balances, N losses during composting due to leaching, ammonia emissions and denitrification were 5 to 19% in relation to the initial N.

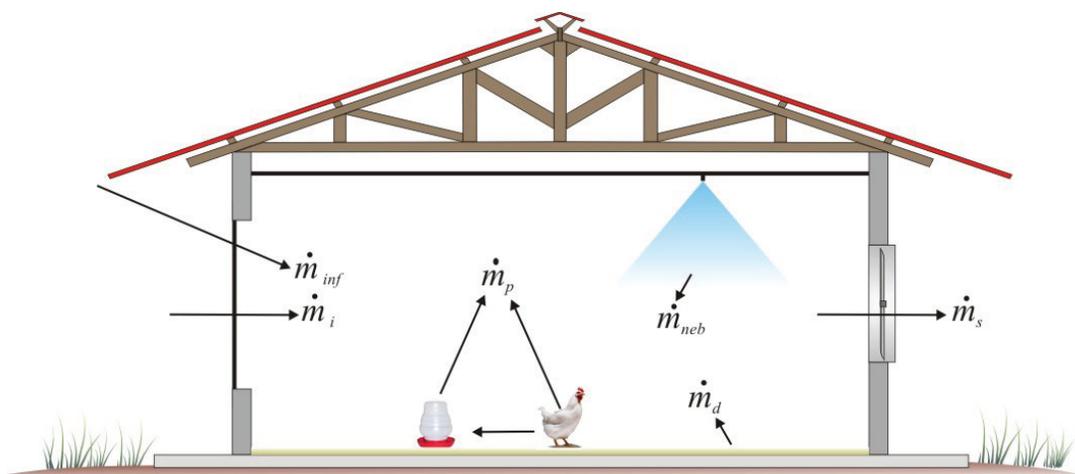


Figure 1. Main parameters used in the mass balance in animal facilities (adapted from Carvalho, 2008).

Teye & Hautala (2008) adapted a theoretical ammonia emission model for conditions of a naturally ventilated dairy cattle installation. For this purpose different mass transfer models were utilized and these were then evaluated experimentally. Also calculated were the mass balances of ammonia and carbon dioxide concentrations, directly measured in the installation. These authors concluded that the absolute mean difference and standard error between the ammonia emissions from the theoretical model and the experimental measurements was  $0.013 \pm 0.05 \text{ g m}^{-3} \text{ h}^{-1}$ . The variation in ammonia emissions during the day and night were 0.04 and  $0.58 \text{ g m}^{-3} \text{ h}^{-1}$ , respectively.

Michel *et al.* (2001) estimated N and water losses via a mass balance, comparing a commercial High-Rise™ Hog Building (HRHB) with conventional deep pit systems. As a result, mass balance calculations based on the consumption of feed and level of protein for the finishing animals and N content of the deep pit effluent showed that 70 to 73% of the excreted N, and 79% of the excreted water showed losses during accumulation of manure in the installation. These losses were probably due to volatilization of ammonia and evaporation of water due to the ventilation system.

According to Mueller & Krause (2007), when sizing ventilation systems there are different methods which may be used to

obtain an overall view of the mass transport phenomena inside the animal production facility, including numerical simulation of flow, physical models and measurements on a real scale.

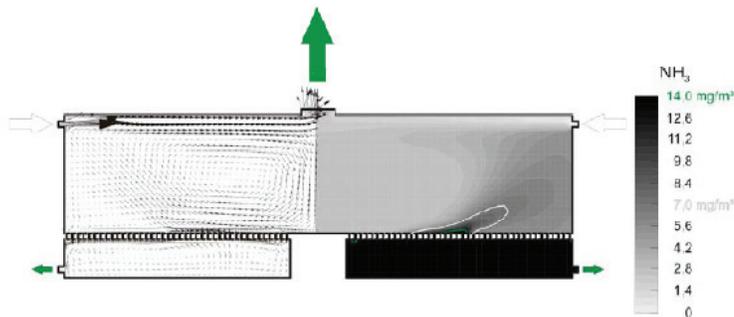
a) Numerical simulation of flow: from this simulation it is possible to study the behavior of fluids in movement. Therefore, it has become very interesting to study these phenomena with the advance of faster computer processors and more efficient software. Fluid mechanics include, for example, study of either laminar or turbulent fluid and gas flow in animal installations. This type of study may present important practical applications in the diverse areas of engineering.

b) Physical models: investigations with physical models offer greater support to the numerical simulation of mass flux. The ventilation system as well as the flux of air volume may be altered by a simple formula, i.e., the reconstruction of entire elements may be performed quite simply in such models. Figure 2a shows an example of a model for investigation of diverse methods of ventilation to reduce emission mass flows (Mueller & Krause, 2007).

c) Another form of evaluating the dispersion behavior of gases coming from animal installations is by means of the utilization of the wind tunnel boundary limit, which in many cases are equipped with air velocity sensors and



(a)



(b)

Figure 2. Physical model for (a) to study the emission of gases and their influence under different conditions of ventilation and (b) CFD simulation result in the behavior of the dispersion of ammonia in the wind tunnel boundary layer for plants in pigs (Mueller & Krause, 2007).

gas analyzers to measure the variation in concentration (Figure 2b).

d) Real scale measurements: are necessary to confirm the numerical and physical models in real conditions. A specific problem is the determination of volumetric air flux in naturally ventilated animal installations (Mueller & Krause, 2007).

Various studies involving mathematical modeling and computational simulations have been developed during experimentation to improve understanding on the processes involved in the transfer of heat and mass between animals and the thermal environment.

**CFD and the governing equations for transport of mass, momentum, energy and species**

Computational fluid dynamics (CFD) can be defined as a numerical resolution based on computational loops and the equations of mass, momentum and energy conservation for physical systems.

This technique provides precise solutions as well as visualizations of velocity, pressures, temperature, turbulence and gas concentrations in the entire space of the animal installation without various physical scale test models. Results allow engineers and operators to develop new ventilation strategies to meet the standards for air quality (Lee & Short, 2000).

Modeling in CFD is important to predict mass transport in different types of animal structures, especially when measuring of the variables related to the model in the field is difficult. In the case of modeling gas emission present inside the installations, for example  $\text{NH}_3$ , the computational models are based on the  $\text{NH}_3$  transport process and the transport mechanism to the atmosphere (Bjerg *et al.* 2002).

The governing equations of fluid flow and heat transfer can be considered as mathematical formulations of the laws of conservation which regulate all fluid flows, heat transfer and associated phenomena. These laws of conservation describe the rate of variation of a desired fluid property as a function of external forces and can be written as (Tu *et al.* 2007):

Continuity equation: the mass flows entering a fluid element must be equal to those exiting.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i) = 0 \quad (2)$$

Conservation of momentum: sum of the external forces acting on a fluid particle is equal to its variation in linear momentum.

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t} (\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_i u_j) \\ &= \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ -p \delta_{ij} + \mu \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] + \rho g_i \end{aligned} \quad (3)$$

Conservation of energy: the rate of energy variation of a fluid particle is equal to the addition of heat and work performed on the particle.

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho C_a T) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j C_a T) - \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial x_j} \right) = s_T \quad (4)$$

Species conservation equation: if the viscous fluid is composed of a binary mixture in which there are species concentration gradients, relative transport of the species and species conservation must be satisfied in each point in the fluid.

$$u \frac{\partial C_A}{\partial x} + v \frac{\partial C_A}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left( D_{AB} \frac{\partial C_A}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( D_{AB} \frac{\partial C_A}{\partial y} \right) \quad (5)$$

## Ventilation system

Ventilation systems are an efficient means of temperature control within animal installations by increasing thermal exchange by convection. Adequate ventilation is necessary to eliminate excess environmental humidity and bedding, resultant from water liberated by animal respiration and manures, as well as carbonic gases and gases resultant of fermentation (Abreu & Abreu, 2000).

When considering ventilation, animal production installations may be open or closed. According to Zanolla *et al.* (1999), the acclimatization systems used in countries of Europe and the USA and also being adapted in Brazil, is known as tunnel ventilation. This system basically consists of the distribution of fans along the installation which suck in external air through a tunnel, permitting that the ventilated air mass uniformly passes through the entire building, exiting at the opposite end.

Therefore, in accordance with Norton *et al.* (2007), the modeled representation of a naturally ventilated installation in a computational domain with CFD models will allow a greater number of approaches, where the model may be constructed by:

- Both internal and external regions of the installation, ventilated naturally;
- Internal and external regions divided in subdomains and solved independently, interpolating the solutions and combining the interface regions;
- Only the internal environment.

The first approach presents the advantage of directly connecting the internal and external environments. However, to perform this type of simulation a large computational force is needed due to the interlacing required for the shock between entering and exiting air. This may be aggregated by the large quantity of detail inside the installation, thus requiring a large computational time to conclude the simulation (Boulard *et al.* 2002).

The second method is not frequently encountered, although in some large scale simulations this technique is used, because the direct linking of the internal and external environments in the installation is not reached because of the lack of sufficient computational resources (Jiang & Chen, 2001 and 2002). The last method has shown shortcomings in some cases, presenting many solutions, having no similarity with the physical flow regime (Fracastoro & Perino, 1999).

Rarely have studies compared CFD models for animal installations with natural and forced ventilation. Due to the boundary conditions, where direction and velocity are not uniform along the installation at any moment in time, studies

considering natural ventilation systems are more difficult to evaluate than those of installations with forced ventilation. Various studies conducted with natural and mechanical ventilation have utilized the turbulent flow model to simulate the linking of different models with the objective of obtaining better results.

Therefore, for systems with natural and forced ventilation, some studies recommend the use of the Standard  $k-\epsilon$  model to describe the turbulent portion of the flow (Bartzanas *et al.* 2004; Blanes - Vidal *et al.* 2008) due to its favorable convergence and reasonable precision. Some recent studies have shown better results using the Renormalization-Group (RNG)  $k-\epsilon$  model to simulate air movement inside and outside of the installations (Bartzanas *et al.* 2007; Stavrakakis *et al.* 2008; Seo *et al.* 2009), taking into consideration that the RNG  $k-\epsilon$  is similar to the Standard  $k-\epsilon$  model. However, the RNG  $k-\epsilon$  model includes additional terms for the development of dissipation rates which significantly improve its precision.

For mass balance simulations in animal installations, the turbulent flow model could be adapted based on the RANS models and concentration equations, together with the RNG  $k-\epsilon$  model (Lee & Short, 2000). Due to the high frequency and small scale fluctuations of turbulent flow, the instantaneous fluid velocity is the difficultly encountered and is often assumed to be the average velocity and a component of the velocity of turbulent fluctuation. The Reynolds tensions are assumed proportional to the average velocity gradients, adapting air as an ideal gas and coupling the fields of velocity and temperature, also known as the Boussinesq approximation (Lee & Short, 2000).

One of the limitations for the use of these equations for the simulation of the internal and external environment in animal installations is related to pressure conditions not being considered if the conditions of fluid velocity are too not specified, i.e., fluid velocity is influenced by the pressure gradient. The only exception is when the pressures are necessary to specify the fluid properties.

Another aspect to be considered in the CFD models of animal production installations is the air propulsion force, principally when working with natural ventilation systems or natural together with forced ventilation. According to Norton *et al.* (2007) two methods may be used: the Boussinesq approximation, which has been intensely utilized in animal production applications; and the second method, in which the Boussinesq approximation is an expression which treats air as an ideal gas and connects the fields of velocity and temperature; the first one is most commonly used.

Despite the importance of the propulsion forces, the majority of studies use the initial models without considering this aspect, and only when good results are not obtained is this

condition introduced, which due to its numerical complexity makes convergence more difficult.

### CFD simulation for animal installations

The first studies using livestock installations in CFD were performed by Choi *et al.* (1998), in which a simple geometry was employed to represent the animal installation, but results showed little precision. Small advances in the development of real solutions were made in the next year.

Hoff *et al.* (1992) utilized CFD to model air flow in a rectangular shaped installation, in which heat transfer was modeled using a heated floor. Harral & Boon (1997) simulated later isothermal flow patterns in a 3D geometric representation of a cattle confinement. In following years, more studies were developed for validation of animal installations with a focus on the creation of more precise CFD models (Zhang *et al.* 2000).

Only in recent years have CFD models, used for simulation of heat and mass transfer in a geometric representation, become reliable in animal production installations (Van Wagenberg *et al.* 2004). Therefore, when using dynamic models together with estimates provided by CFD, more detailed conditions are provided of all phenomena which occur.

#### a) Birds

Among environmental factors, thermal factors represented by air temperature, relative humidity, thermal radiation and air movement are those which most directly affect the bird since they are warm-blooded animals. These environmental variables may have either positive or negative effects on birds production. High temperature and high relative humidities inside aviculture installations are factors which limit the achievement of optimal productivity (Damasceno *et al.* 2010b). Therefore, the need to maintain the thermal environment within an optimal production scale is evident. However, there are few studies with CFD which utilize a mass balance inside aviculture installations.

Worley & Manbeck (1995) utilized a CFD model to analyze the distribution of contaminants in a highly turbulent flow inside an aviculture installation under different roofing configurations. As a result this study obtained a better configuration of air circulation to eliminate particulate material with greater pollutions concentrations.

Pawar *et al.* (2007) compared relationship between diffusion of ammonia gas ( $\text{NH}_3$ ) and dispersion of virus particles analyzing the distribution of virus particles which generate diseases in aviculture installations. In conclusion there is strong relationship between these parameters.

Damasceno *et al.* (2010a) developed and validated a CFD model to analyze the temperature and air velocity distribution inside a common commercial heater used in Brazilian poultry production. These authors concluded that the CFD models may be used for real time prediction of thermal behavior and velocity distribution (inside the combustion chamber for heating), aiding in project improvements.

Tinôco *et al.* (2010) used CFD to simulate an aviculture installation with mechanical ventilation associated with an evaporative cooling system. In this study the authors developed a CFD model to obtain a better understanding of the temperature and air velocity distribution inside the aviculture installation. The obtained results showed a good statistical correlation with experimental data, which permits its use to address future modifications to the installation.

#### b) Cattle

The air quality conditions in a cattle confinement are dynamic and change continuously. Pollutant gases and excesses of humidity, microorganisms and particulate are produced from various sources, such as the floors, walls, feeds, water and air which infiltrates the installation. Therefore gas emissions directly depend on atmospheric influences which permanently change the conditions.

Various approaches to solve this problem have been studied. The quantification of carbon dioxide as well as mass and heat balances were performed by Van Ouwkerk & Pedersen (1994) according to a method for calculating the concentration difference between interior and exterior air to determine the concentration levels.

Gebremedhin & Wu (2003) utilized predictions based on CFD simulations to aid in modeling the thermal environment in dairy cattle installations. In their study, the Fortran computational program was used to calculate all models necessary for heat determination and mass transfer on the body of these animals. These authors thus used this method together with CFD simulations for heat and mass transfer between animals and the environment.

Gebremedhin & Wu (2005) studied the utilization of CFD simulations for air flux in a simple geometric cattle installation with forced ventilation to investigate the heat and mass transfer phenomena. They discovered that the total heat loss of an animal is highly dependent on its position and orientation in the flow field. For example, a cow positioned near the air entrance may lose a total of 710 W of heat, while an animal positioned at the other extremity of the installation may lose only 214 W of heat.

#### c) Swine

Production and reproductive performance of swine depend on the employed management system, which involves

the selected system of breeding, nutrition, sanity and the installations themselves. These installations, which demand a large initial investment, are constructed in function of the costs and facilities of the caretaker, often neglecting the comfort of the animals. Thus, many times the application of CFD models on the environment of these animals are directed towards the optimization of environmental conditions (Bjerg *et al.* 2000; Sun *et al.* 2002 and Sun *et al.* 2004). These studies may be efficiently grouped for modeling of pollutant dispersion and the thermal environment inside swine production installations.

## CONCLUSIONS

The studies performed with Computational Fluid Dynamics (CFD) applied to understand the internal environment of animal installations aid in providing knowledge on the heat and mass and energy transfer phenomena, thus assisting to improve or design structures, reducing the time and cost for development and adaptation of projects.

One of the difficulties for CFD simulation of the internal and external environments of animal installations is the fact that fluid velocity is influence by the pressure gradient. Therefore, it is important to accompany the CFD models with experimental results which present good precision, since the results of the model depend largely on these experimental results.

Technological advances with CFD simulations have made it possible that field data may include dynamic biological responses to the encountered phenomena, thus improving the realism of the simulations. Therefore, CFD modeling may offer greater conditions of prediction for simulation of the internal environment of animal installations, giving greater decision making support to the producer, or even be implemented in system controllers for heating or cooling in commercial animal production installations, thus the gas emissions generated for different animals facilities production.

**Acknowledgements:** The authors wish to thank the producers for their participation in the study, and also FAPEMIG, CNPq, CAPES and the Department of Agricultural Engineering of at the Federal University of Viçosa for financial support. **Conflicts of interest:** The manuscript was presented and reviewed with the participation of all the authors who declare that there is not conflict of interest that threatens the validity of the results presented.

## Nomenclature

$A$	Area, (m <sup>2</sup> )
$C_a$	Specific heat capacity, W kg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> ;
$C_A$	Concentration of species A in the gas, g m <sup>-3</sup>
$D_{AB}$	Diffusion coefficient between species A and B, m <sup>2</sup> s <sup>-1</sup>
$g$	Acceleration of gravity, m s <sup>-2</sup> ;
$u$	Velocity vector, m s <sup>-1</sup> ;
$i, j$	Cartesian coordinate index, m;
$\dot{m}_{neb}$	Mass of water applied by misting, , m s <sup>-1</sup> ;
$\dot{m}_{inf}$	Mass flows of air which infiltrate, m s <sup>-1</sup> ;
$\dot{m}_i$	Mass flows of air which enter, m s <sup>-1</sup> ;
$\dot{m}_s$	Mass flows of air which exit, m s <sup>-1</sup> ;
$\dot{m}_p$	Mass production of water vapor by the animal, m s <sup>-1</sup> ;
$\dot{m}_d$	Mass production of waste, m s <sup>-1</sup> ;
$p$	Pressure, Pa;
$T$	Temperature, K;
$t$	Time, s;
$S_T$	Thermal dissipater or source, W m <sup>-3</sup> ;
$x$	Cartesian coordinate , m;
<b>Greek Symbols</b>	
$\lambda$	Thermal conductivity, W m <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> ;
$\delta$	Kronecker delta;
$\mu$	Dynamic viscosity, kg m <sup>-1</sup> s <sup>-1</sup> ;
$\rho$	Density of the fluid, kg m <sup>-3</sup> ;
<b>Subscripts</b>	
$t$	Turbulence;

## REFERENCES

1. ABREU, P.G.; ABREU, V.M.N. 2000. Ventilação na avicultura de corte. Concórdia: Embrapa Suínos e Aves. 50p.
2. BAËTA, F.C.; SOUZA, CF. 1997. Ambiente em edificações Rurais: conforto térmico animal. Viçosa, MG: UFFV. 246p.
3. BARTZANAS, T.; KITTAS, C.; SAPOUNAS, A.A.; NIKITA-MARTZOPOULOU, C. 2007. Analysis of airflow through experimental rural buildings: Sensitivity to turbulence models. Biosystems Engineering. 97(2):229-239.
4. BARTZANAS, T., BOULARD, T., KITTAS, C. 2004. Effect of vent arrangement on windward ventilation of a tunnel greenhouse. Biosystems Engineering. 88(1):479-490.
5. BJERG, B.; SVIDT, K.; ZHANG, G.; MORSING, S. 2000. The effect of pen partitions and thermal pig simulators on airflow in a livestock test room. J. Agr. Engineering Res. 77(2):317-326.
6. BJERG, B.; SVIDT, K.; ZHANG, G.; MORSING, S.; JOHNSEN, J.O. 2002. Modeling of air inlets in CFD prediction of airflow in ventilated animal houses. Computers and Electronics in Agriculture, 34(3):223-235.
7. BLANES-VIDAL, V.; GUIJARRO, E.; BALASCH, S.; TORRES, A.G. 2008. Application of computational fluid dynamics to the prediction of airflow in a mechanically ventilated commercial poultry building. Biosystems Engineering. 100(1):105-116.
8. BOULARD, T.; KITTAS, C.; ROY, J.C. 2002. Structures and Environment: Convective and Ventilation

- Transfers in Greenhouses, Part 2: Determination of the Distributed Greenhouse Climate. *Biosystems Engineering*. 83(2):129-147.
9. BOUWMAN, A.F.; LEE, D.S.; ASMAN, W.A.H.; DENTENER, F.J.; VAN DER HOEK, K.W.; OLIVIER, J.G.J. 1997. A global high-resolution emission inventory for ammonia. *Global Biochemical Cycles*. 11(1):561-587.
  10. CARVALHO, V.F.; YANAGI JR, T.; XIN, H.; GATES, R.S.; DAMASCENO, F.A.; MORAES, S.R.P. 2008. Mathematical Model for Thermal Environment and Broiler Chickens Performance Prediction in Acclimatized Housings. ASAE paper No 701P0408. Foz do Iguaçu, Brazil: ASAE.
  11. CHOI, K.; ALBRIGHT, L.D.; TIMMONS, M.B. 1998. An application of the k-e turbulence model to predict air distribution in a slot ventilated enclosure. *Transactions of the ASAE*. 31(2):1804-1814.
  12. DAMASCENO, F.A.; AMARAL, A.G.; MARTINS, M.A.; SARAZ, J.A.O.; BAÊTA, F.C. 2010a. Dinâmica do fluido computacional para simulação da temperatura e velocidade do ar em sistema de aquecimento avícola. In: Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola, 38. 2010, Vitória. Anais. Vitória: Soc. Bras. de Eng. Agr.
  13. DAMASCENO, F.A.; YANAGI JUNIOR, T.; LIMA, R.R.; GOMES, R.C.C.; MORAES, S.R.P. 2010b. Avaliação do bem-estar de frangos de corte em dois galpões comerciais climatizados. *Ciência Agrotecnica*, Lavras. 34 (2): 1031-1038.
  14. FRACASTORO, G.V.; PERINO, M. 1999. Numerical Simulation of Transient Effects of Window Openings. In: Proceedings of First International One day Forum on Natural and Hybrid Ventilation, HybVent Forum'99, Sydney, Australia. 425p.
  15. GARRISON, M.V.; RICHARD, T.L.; TIQUIA, S.M.; HONEYMAN, M.S. 2001. Nutrient losses from unlined bedded swine hoop structures and an associated windrow composting site. ASAE paper No 01-2238. St. Joseph, Michigan: ASAE. 13-24.
  16. GEBREMEDHIN, K.G.; WU, B. 2005. Simulation of flow field of a ventilated and occupied animal space with different inlet and outlet conditions. *Journal of Thermal Biology*. 30(5):343-353.
  17. GEBREMEDHIN, K.G.; WU, B.X. 2003. Characterization of flow field in a ventilated space and simulation of heat exchange between cows and their environment. *J. Thermal Biol.* 28(1):301-319.
  18. HOFF, S.J.; JANNNI, K.A.; JACOBSON, L.D. 1992. Three-dimensional buoyant turbulent flows in a scaled model, slot-ventilated, livestock confinement facility. *Transactions of the ASAE*. 35(2):671-686.
  19. HARRAL, B.B.; BOON, C.R. 1997. Comparison of predicted and measured air flow patterns in a mechanically ventilated livestock building without animals. *J. Agr. Eng. Res.* 66(2):221-228.
  20. JIANG, Y.; CHEN, Q. 2002. Effect of fluctuating wind direction on cross natural ventilation in buildings from large eddy simulation. *Building and Environment*. 37(1):379-386.
  21. JIANG, Y.; CHEN, E.Q. 2001. Study of natural ventilation in buildings by large eddy simulation. *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.* 89(13):1155-1178.
  22. LEE, I.B.; SHORT, T. 2000. Two-dimensional numerical simulation of natural ventilation in a multi-span greenhouse. *Transactions ASAE*. 43(3):745-753.
  24. MENEGALI, I.; TINÓCO, I.F.F.; BAÊTA, F.C.; CECON, P.R.; GUIMARÃES, M.C.C.; CORDEIRO, M.B. 2009. Ambiente térmico e concentração de gases em instalações para frangos de corte no período de aquecimento. *Rev. Bras. Eng. Agr. Amb.* 13(2):984-990.
  25. MICHEL, F.C. Jr.; PECCHIA, J.; SUN, H.; KEENER, H. 2001. Use of a High Rise building and composting to manage swine manure. Proceedings Addressing Animal Production and Environmental Issue (CD). North Carolina State University. Triangle Research Park, NC. Poster, 24.
  26. MIRAGLIOTTA, M.Y.; NÄÄS, I.A.; BARACHO, M.S.; ARADAS, M.E.C. 2002. Qualidade do ar de dois sistemas produtivos de frango de corte com ventilação e densidade diferenciadas: estudo de caso. *Eng. Agr.* 22(2):1-10.
  27. MOSS, A.R.; JOUANY, J.P.; NEWBOLD, J. 2000. Methane production by ruminants: its contribution to global warming. *Ann. Zootechnie*. 49(1):231-253.

28. MUELLER, H.J.; KRAUSE, K.H. 2007. Flow simulation for design of ventilation systems in animal houses. *Building Simulation*, New York, p.932-936.
29. NADER, A.S.; BARACHO, M.S.; NÄÄS, I.A.; SAMPAIO, C.A.P. 2002. Avaliação da qualidade do ar em creche de suínos. In: *Seminário Poluentes Aéreos e Ruídos em Instalações para Produção de Animais*. Campinas. Anais. Campinas: UNICAMP. p.49-56.
30. NORTON, T.; GRANT, J.; FALLON, R.; SUN, D. W. 2009. Assessing the ventilation effectiveness of naturally ventilated livestock buildings under wind dominated conditions using computational fluid dynamics. *Biosystems Eng.* 103(1):78-99.
31. NORTON, T.; SUN, D.W.; GRANT, J.; FALLON, R.; DODD, V. 2007. Applications of computational fluid dynamics (CFD) in the modelling and design of ventilation systems in the agricultural industry: A review. *Bioresource Techn.* 98(12):2386-2414.
32. OSORIO, J.A.; TINOCO, F.F.; CIRO, H.J. 2009. Ammonia: a review about concentration and emission models in livestock structures. *Dyna.* 76 (158):89-99.
33. PAWAR, S.R.; CIMBALA, J.M.; WHEELER, E.F.; LINDBERG, D.V. 2007. Analysis of poultry house ventilation using computational fluid dynamics. *Transactions of the ASABE.* 50 (4): 1373-1382.
34. PRUEGER, J.H.; EICHINGER, W.E.; HIPPS, L.E.; HATFIELD, J.L.; COOPER, D.I. 2008. Air-flow distortion and turbulence statistics near an animal facility. *Atmospheric Environ.* 42(3):3301-3314.
35. SAMPAIO, C.A.P.; NAAS, I.A.; NADER, A. 2005. Gases e ruídos em edificações para suínos aplicação das normas NR-15, CIGR e ACGIH. *Eng. Agr., Jaboticabal.* 25(1):10-18.
36. SEO, I.H.; LEE, I.B.; MOON, O.K.; KIM, H.T.; HWANG, H.S.; HONG, S.W. 2009. Improvement of the ventilation system of a naturally ventilated broiler house in the cold season using computational simulations. *Biosystems Engineering.* 104(1):106-117.
37. SILVEIRA, N.A.; NAAS, I.A.; MOURA, D.J.; SALGADO, D.D. 2009. Ambiente aérea em maternidade e creche de suínos. *Eng. Agr., Jaboticabal.* 29(3):348-357.
38. SOMMER, S.G.; DAHL, P. 1999. Nutrient and carbon balance during the composting of deep litter. *J. Agr. Eng. Res.* 74(1):145-153.
39. STAVRAKAKIS, G.M.; KOUKOU, M.K.; VRACHOPOULOS, M.G.; MARKATOS, E.N.C. 2008. Natural cross-ventilation in buildings: Building-scale experiments, numerical simulation and thermal comfort evaluation. *Energy and Buildings.* 40(9):1666-1681.
40. SUN, S.H.; KEENER, R.; STOWELL, R.; MICHEL, F.C. 2002. Two-dimensional computational fluid dynamics (CFD) modeling of air and ammonia distribution in a High-Rise™ Hog Building (HRHB). *Transactions of the ASAE.* 45(5):1559-1568.
41. SUN, S.H.; KEENER, H.; WEI DENG, R.; MICHEL, F.C. 2004. Development and validation of 3-d CFD models to simulate airflow and ammonia distribution in a high-rise™ hog building during summer and winter conditions. *Agr. Eng. Internal: the CIGR J. Scient. Res. and Developm.* 4(6):1121-1134.
42. TEYE, F.K.; HAUTALA, M.. 2008. Adaptation of an ammonia volatilization model for a naturally ventilated dairy building. *Atmospheric Environ.* 42(2):4345-4354.
43. TINOCO, I.F.F.; OSORIO, J.A.S.; GATES, R.S.; DAMASCENO, F.A.; MARIN, O.L.Z. 2010. 3D-CFD modeling of a typical uninsulated and internal misting tunnel ventilated brazilian poultry house. *ASAE paper No 1009150.* St. Joseph, Pittsburgh: ASAE. p.35-42.
44. TU, J.; YEOH, G.H.; LIU, C. 2007. *Approach.* Butterworth-Heinemann. 472p.
45. TYRRELL, H.F. 2001. Principles of animal nutrition and mass balance relative to nutrient management. *Proceedings Addressing Animal Production and Environmental Issue (CD).* North Carolina State University. Triangle Research Park, NC. 324p.
46. VAN WAGENBERG, A.V.; BJERG, B.; BOT, G.P.A. 2004. Measurements and simulation of climatic conditions in the animal occupied zone in a door ventilated room for piglets. *Agr. Eng. Internal: The CIGR J. Scient. Res. and Developm.* Manuscript BC 03 020.
47. VAN OuwERKERK, E.N.J.; PEDERSEN, S. 1994. Application of the carbon dioxide mass balance method to evaluate ventilation rates in livestock buildings. In: *Proc. XII World Congress on Agricultural Engineering, Milano, Italy.* p.516-529.

48. WATSON, R.T.; MEIRA FILHO, L.G.; SANHUEZA, E.; JANETOS, T. 1992. Sources and sinks. In: Houghton, J.T; Callander, B.A; Varney, S.K (eds). *Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, UK. p.25-46.
49. WORLEY, M.S.; MANBECK, H.B. 1995. Modelling particle transport and air flow in ceiling inlet ventilation systems. *Transactions of the ASAE*. 38(1): 231–239.
50. ZANOLLA, N.; TINÓCO, I.F.F.; BAÊTA, F.C.; CECON, P.R.; MORAES, S.R.P. 1999. Sistema de ventilação em túnel e lateral na criação de frangos de corte com alta densidade. *Rev. Bras. Eng. Agr. e Ambiental*, Campina Grande. 3(3):361-366.
51. ZHANG, G.; MORSING, S.; BJERG, B.; SVIDT, K.; STROM, J. S. 2000. Test room for validation of airflow patterns estimated by computational fluid dynamics. *J. Agr. Eng. Res.* 76(3):141-148.

Recibido: Febreo 1 de 2011

Aceptado: Agosot 30 de 2011

# AISLAMIENTO E IDENTIFICACIÓN DE AGENTES BACTERIANOS PRODUCTORES DE ONFALITIS EN TERNEROS DEL DEPARTAMENTO DE CÓRDOBA

## ISOLATION AND IDENTIFICATION OF BACTERIAL AGENTS, PRODUCING ONFALITIS IN CALVES IN THE CORDOBA DEPARMENT

José Cardona Á.<sup>1</sup>, Jaime Álvarez P.<sup>2</sup>, Germán Arrieta B.<sup>3</sup>

<sup>1</sup> MVZ, Esp, M.Sc. Universidad de Córdoba. Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia. Departamento de Ciencias Pecuarias. Área de Clínica Médico-Quirúrgica de Grandes Animales. Montería, Colombia. <sup>2</sup> MVZ, Esp, M.Sc. Universidad de Córdoba. Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia. Instituto de Investigaciones Biológicas del Trópico. Montería, Colombia. jalvarezpt@yahoo.com.

Rev. U.D.C.A Act. & Div. Cient. 14(2): 95 - 99, 2011

### RESUMEN

Las onfalitis son problemas muy frecuentes en las explotaciones bovinas, razón por la cual, con el presente trabajo, se pretendió aislar e identificar agentes bacterianos productores de onfalitis en terneros. Se realizó un estudio descriptivo de corte transversal, de tipo no probabilístico de conveniencia en terneros con onfalitis; se utilizaron 35 terneros con edades comprendidas entre 3 y 90 días de nacidos, escogidos en diez explotaciones ganaderas, del municipio de Cereté, Córdoba. Los animales fueron evaluados mediante la realización de un examen clínico general y examen detallado del ombligo, determinando así la presentación de inflamación, a este nivel, y teniendo en cuenta la ausencia o presencia de fistula, con secreción de material purulento. El 48,57% de los animales estudiados presentaron onfalitis fistulada y el 51,42%, onfalitis no fistulada. El 100% de los animales estudiados manifestaron onfalitis. Las bacterias con mayor prevalencia en las muestras analizadas fueron *Staphylococcus aureus* (22,5%), *Escherichia coli* (22,5%), *Staphylococcus* sp. (15%), *Klebsiella* sp. (9,68%), *Proteus vulgaris* (9,68%), *Pseudomona* sp. (6,46%), *Proteus mirabilis* (3,23%), *Enterobacter* sp. (3,23%), *Chryseobacterium meningosepticus* (3,23%), *Alcaligenes* sp. (1,40%), *Citrobacter koseri* (1,40%). Cabe destacar que el 37% de los agentes etiológicos aislados en la infecciones de ombligo pertenecen al grupo de los coliformes totales, lo que indica que no existe un riguroso procedimiento de asepsia en el manejo de ombligo del neonato.

Palabras clave: Ombligo, inflamación, asepsia.

### SUMMARY

Omphalitis problems are very common in cattle farms, but its origin is occasionally unknown. With this study it was sought to isolate and identify bacterial pathogens, omphalitis producers in calves. A cross sectional non-probabilistic study of no convenience was performed in calves affected by omphalitis, using 35 calves, aged between 3 to 90 days, randomly selected at ten live-stook farms in the municipality of Cereté-Córdoba (Colombia). The animals were evaluated by conducting a general clinical exam and detailed examination of the umbilicus, thus determining the production of inflammation at this organ and taking into account the absence or presence of fistula with drainage of purulent material. 48.57% of the calves observed showed omphalitis cannulae, while 51.42% did not present this problem with cannulae. 100% of the animals studied had omphalitis. The most prevalent bacteria obtained from the samples were *Staphylococcus aureus* (22.5%), *Escherichia coli* (22.5%), *Staphylococcus* sp. (15%), *Klebsiella* sp. (9.68%), *Proteus vulgaris* (9.68%), *Pseudomonas* spp. (6.46%), *Proteus mirabilis* (3.23%), *Enterobacter* sp. (3.23%), *Chryseobacterium meningosepticus* (3.23%), *Alcaligenes* sp. (1.40%), *Citrobacter koseri* (1.40%). It should be noted that 37% of the isolated bacteria were umbilical infections belonging to the group of total coliforms, which indicated the absence of a strict aseptic procedure in the management of neonatal umbilicus.

Key words: Navel, inflammation, asepsis.

## INTRODUCCIÓN

La onfalitis es una condición patológica que ocurre con mayor frecuencia en terneros de dos a cinco días de nacidos, que puede persistir por varias semanas o meses (Scott, 1995).

La inflamación de la parte externa del ombligo, también conocida en la costa atlántica Colombiana como "platanito", se presenta como una dilatación o aumento de tamaño de la región umbilical, que registra dolor a la palpación; además, se detectan estructuras cilíndricas justo por encima del ombligo y de consistencia firme, en algunos casos fluctuantes, cuando se ha desarrollado un absceso (Neuman, 1991; Alvarado, 1998; Gazquez, 1991). El ombligo puede estar cerrado o abierto supurando material, a través de una fístula pequeña; el pus, en muchos casos, tiene un olor fétido y el ombligo afectado puede adquirir un gran tamaño, causando toxemia subaguda, por lo que el ternero con onfalitis está moderadamente deprimido con reacción febril, aumento de la frecuencia cardíaca y respiratoria, dolor y diversos grados de depresión, que resultan en una pérdida del apetito (Medina, 1994; Blood & Radostits, 2002; Andrade De Los Santos, 1982; Berra *et al.* 2004).

Los primeros signos de septicemia en el recién nacido son vagos, no específicos y, a menudo, indistinguibles de los de las enfermedades no infecciosas o infecciones focales. Los recién nacidos suelen desarrollar septicemia con un shock séptico, que puede resultar en una falla múltiple de órganos, con posibilidades de éxito que tiene en un plan de tratamiento. Los neonatos con septicemia pueden morir en el primero o segundo día de vida, sin mostrar ningún síntoma, excepto pulso débil e hipotermia, frecuentemente, sin evidencia de diarrea u onfalitis clínica (Kasari & Roussel, 1999; Smith, 2006).

Los microorganismos aislados, con frecuencia de las onfalitis en terneros son encontrados en las bacteremias y en las septicemias, lo que muestra a las estructuras umbilicales como puerta importante en la entrada de los patógenos, causantes de onfalitis (Hathaway *et al.* 1993; Ogilvie, 2000; Radostits *et al.* 2002; Rengifo *et al.* 2006). Los inadecuados manejos del ombligo en el neonato, la falta de asepsia, la utilización de soluciones antisépticas contaminadas son factores que predisponen a onfalopatías (Radostits *et al.* 2002).

La alta tasa de mortalidad neonatal en bovinos, se debe a las dificultades que, continuamente, enfrentan los terneros durante la adaptación a la vida postnatal (Benesi, 1993; Donovan *et al.* 1998; Feitosa *et al.* 2001; Smith, 2006). Una de ellas es la insuficiente transferencia de inmunidad pasiva, convirtiéndolo en un blanco fácil para las infecciones bacterianas y virales (White, 1993).

Los animales que reciben poca transferencia de inmunoglobulina, ya sea por abandono o por la imposibilidad de amamantar y el hambre, conlleva a una mayor susceptibilidad a las infecciones, repercute en la mortalidad y la incidencia de enfermedades, como colibacilosis, poliartrosis, infecciones virales y la septicemia entérica, durante la primera semana de vida (Feitosa *et al.* 2001).

Muchos agentes diferentes pueden dar lugar a bacteremias y a síndrome sepsis por bacterias Gram-negativas aerobias, como principal causa de septicemia en potros y en terneros recién nacidos (Ogilvie, 2000). *Escherichia coli* y *Salmonella* spp. son citados como los agentes causales más comunes en los casos de bacteremia y septicemia en terneros (Radostits *et al.* 2002).

Los modelos de producción animal en el departamento de Córdoba, donde se manejan sistemas de explotación de cría libre y doble propósito, muestran una moderada incidencia de terneros con onfalitis, siendo una de las principales causas de muerte neonatal, después de las diarreas y las neumonías (Gonçalves *et al.* 2001). La presente investigación, se realizó con el fin de identificar los principales agentes bacterianos productores de onfalitis en terneros.

## MATERIALES Y MÉTODOS

Se realizó un estudio de corte transversal de tipo no probabilístico de conveniencia en terneros con onfalitis. Se evaluaron 35 terneros con onfalitis, en diez explotaciones de doble propósito, en el municipio de Cereté, Córdoba (Colombia), ubicado en la margen derecha del río Sinú, localizado en el extremo noroccidental del departamento de Córdoba, a 8°53'00" latitud norte, y 75°47'45" longitud oeste de Greenwich, con una altura de 12 metros sobre el nivel del mar, temperatura promedio de 28° C, precipitación pluvial de 1198 a 1567 mm anuales, humedad relativa del 82%.

La toma de muestra, se realizó después de una previa inmovilización de los terneros con onfalitis y asepsia del área umbilical, se realizaron cinco desinfecciones con yodo al 10%, para proceder a efectuar la disección de la piel para llegar a la fibrosis. La incisión se hizo lateral y dorsal al ombligo, a 1cm del punto umbilical; posteriormente, se tomaron las muestras con escobillones estériles (CultureSwab Plus™). Las muestras fueron refrigeradas hasta su procesamiento en el laboratorio.

A cada animal se le tomaron los siguientes datos: identificación, edad, métodos de curación del ombligo, tipo y material de desinfección, enfermedades anteriores y tratamientos anteriores.

El aislamiento e identificación microbiológica, se llevó a cabo en el Instituto de Investigaciones Biológicas del Trópico, de la Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia de la Universidad de Córdoba. Utilizando métodos convencionales de la FDA (Federal and Drug Administration), las muestras fueron sembradas en medios de cultivos para hongos y para levaduras, bacterias Gram positivas y Gram negativas (caldo BHI, Agar Sangre, Agar Mac Conkey, Bair Parker, agar YGC, agar EMB, agar XLD, agar Hecktoen). Para la identificación de los microorganismos, se aplicaron pruebas bioquímicas, utilizando el sistema IDS rapid system (sistema para la identificación de microorganismos anaerobios, Enterobacterias, no fermentadores, *Streptococcus*, *Corynebacterium*, levaduras); este sistema dispone de sustratos cromógenos y convencionales modificados. Para la confirmación de los microorganismos, se recurrieron a pruebas serológicas. La identificación de enterobacterias y *Staphylococcus aureus*, se ejecutó por el sistema de identificación MICROSCAN.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En el 70% de las fincas ganaderas donde se llevó a cabo el estudio, la curación del ombligo se efectuó por inmersión de éste en tintura de yodo, entre las 10 y 48 horas posnatal y, el 30% restantes, se utilizó aspersión con violeta de genciana y similares, entre las 10 y 48 horas posnatal.

No se reportó el padecimiento de enfermedades pasadas y el 42,9% (15/35 animales) recibieron tratamiento antimicrobiano, con el objeto de aliviar la onfalitis.

No se observó el crecimiento de hifas y/o levaduras en el medio utilizado, situación que contrasta con estudios que reportan aislamiento de *Fusobacterium necrophorum*, en diferentes tipos de abscesos 1977 (Shinjo, 1983; Kano, 1990) y en algunas onfalopatías (Narongwanichgarn *et al.* 2001).

El 48,57% de los animales (17/35) presentaron onfalitis fistulada y el 51,42% (18/35) onfalitis no fistulada.

En las onfalitis fistuladas, se aislaron especies bacterianas, como *Alcaligenes sp.*, *Cryceobacterium meningosepticum*, *Enterobacter agglomerans*, *Enterobacter cloacae*, *Enterobacter sp.*, *Escherichia coli*, *Klebsiella pneumoniae*, *Proteus mirabilis*, *Proteus vulgaris* y *Staphylococcus sp.*

En las onfalitis no fistulada, se identificaron especies, tales como *Citrobacter koseri*, *E. coli*, *K. genitalium*, *Pseudomonas aeruginosa* y *P. putida*. Las bacterias con mayor porcentaje de infección fueron *E. coli*, con 22,58% y *Staphylococcus aureus*, con 22,58%, aisladas en onfalitis, tanto fistuladas como no fistuladas.

Los porcentajes de bacterias identificadas fueron variados, siendo *E. coli* y *S. aureus* los microorganismos de mayor frecuencia (22,58%), seguido por *Staphylococcus spp.* (16,13%), *Proteus vulgaris* (9,68%), *Klebsiella spp.* (9,68%), *Pseudomonas spp.* (6,46%), *Proteus mirabilis* (3,23%), *Enterobacter spp.* (3,23%), *Ch. alcaligenes spp.*, *C. koseri* (1,40%). Los géneros de asociación más frecuentes fueron: *Escherichia*, con *Proteus mirabilis* y *Escherichia*, con *P. vulgaris*, con dos casos para cada asociación y *Escherichia*, con *Enterobacter cloacae*, *Escherichia*, con *C. koseri* y *Escherichia*, con *Klebsiella spp.*, con un caso para cada asociación.

*Escherichia coli* y *Staphylococcus spp.* fueron las bacterias que mayor frecuencia presentaron, datos que concuerdan con lo reportado por Merchant & Packer (1980), quienes apreciaron mayores porcentajes de estas bacterias en su estudio; sin embargo, sí aislaron bacterias anaerobias, mientras que en este estudio, no; esto se pudo deber a que en el momento de producirse la infección no se encontraban presentes estas bacterias en el ambiente o podría ser que al diseccionar las onfalitis no fistuladas para tomar la muestra, las bacterias al tener contacto con el ambiente aerobio, fueron estresadas, debilitándose y disminuyendo considerablemente su capacidad de crecimiento en los medios de cultivo (Merchant & Packer, 1980). Por otro lado, Starost (2001) reporta el aislamiento de *Haemophilus somnus* desde una onfalitis que presentaba absceso de uraco en un becerro; no obstante, Anderson (2004) manifiesta que la causa más común de infección umbilical es el *Arcanobacterium pyogenes* y *E. coli*, relacionándolos con la presentación de infección sistémica y poliartitis séptica; de igual forma, Jacson (1999) y Rings (1995), señalan que la causa más común de artritis séptica en terneros es el *Actinomyces pyogenes* y la *E. coli*, seguida de *Salmonella*, *Streptococcus* y *Staphylococcus*, teniendo todas estas, como fuente de infección, el mal manejo del ombligo. Watt (1980) reporta en corderos, como causa de artritis séptica, a la *E. coli* y más común al *Streptococcus haemolyticus*, *Streptococcus dysgalactiae* y más raramente, *Erysipelothrix insidiosa*.

Las bacterias aisladas de las masas umbilicales infectadas y estructuras profundas, en general, pertenecen a géneros que tienen la capacidad de crecer bajo condiciones anaerobias. Normalmente, existe una flora bacteriana mixta, que comprende *Corynebacterium pyogenes*, que es la bacteria aislada más frecuente y tiene la capacidad de formar abscesos encapsulados con una delgada capa fibrosa, *E. coli*, *Proteus spp.*, *Staphylococcus* y *Streptococcus*. Con menos repetición, se han presentado *Salmonella Dublin* y *Mycoplasma alkalescens* (Merchant & Packer, 1980); Anderson (2004) manifiesta que la causa más común de infección umbilical es *Arcanobacterium pyogenes* y *E. coli*, relacionándolos con la presentación de infección sistémica y

poliartritis séptica, mientras que Smith (2005) afirma que la causa de onfaloflebitis en terneros es *Salmonella* y *E. coli*. Estos datos contrastan con los registrados en este estudio, para *Salmonella* y para *Staphylococcus*, pero coinciden con la frecuencia de onfalitis causadas por *E. coli*.

#### Frecuencia de onfalitis para sexo y tipo racial

Para la variable tipo racial, se pudo encontrar que en un 45,71% (16/35) de los casos pertenecieron a los cruces de Holstein por Cebú, seguido con un 20% (7/35), para el cruce Gyr por Cebú y Pardo Suizo por Cebú, respectivamente, mientras que para animales de la raza Cebú solo se presentó esta afección en un 14,29% (5/35) de los casos; para la variable sexo, se pudo notar que el 60% (21/35) de los casos fueron en machos, mientras que el 40% (14/35) fue en hembras. En la literatura consultada no se apreciaron datos acerca de la frecuencia de la presentación de la onfalitis para las variables raza y sexo; sin embargo, se podría inferir que la menor presentación en la raza cebú se puede deber a la mayor actitud materna de estos animales y a la facilidad y menor duración en las labores de parto, lo que hace que las madres atiendan a sus crías más rápido, como es la limpieza por lamido del cordón umbilical.

En este estudio, se observó que las enterobacterias se constituyen en los principales agentes causantes onfalitis en terneros, destacándose la *E. coli*, además del *S. aureus*, como agente habitual de la piel.

Para disminuir las pérdidas económicas generadas por la mortalidad temprana de terneros en fincas ganaderas, especialmente por onfalitis y las bacteremias y septicemias derivadas de estos procesos, se hace necesario implementar buenas prácticas de manejo, relacionadas con la desinfección del ombligo.

**Agradecimientos.** Al Instituto de Investigaciones Biológicas del Trópico de la Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia de la Universidad de Córdoba. Conflicto de intereses: Los autores del presente escrito declaran que no existe conflicto de intereses que pongan en riesgo la validez de los resultados.

## BIBLIOGRAFÍA

- ALVARADO, L. 1998. Desinfección del cordón umbilical. Bovinos de carne y doble propósito en los trópicos. Bogotá: Ed. Produmedios. p.110-112.
- ANDRADE DE LOS SANTOS, J. 1982. Onfaloflebitis. Patología especial de los animales domésticos. Segunda edición. México: Ed. Interamericana S.A. p.322-335.
- ANDERSON, D. 2004. Surgical Diseases of the Neonate. 23 World Buiatrics Congress. Canada. s.p.
- BENESI, F.J. 1993. Síndrome asfixia neonatal nos bezerros: importância e avaliação crítica. Arqs Esc. Med. Vet. Univ. Fed. Bahia 16:38-48.
- BERRA, G.; OSCAR, G.; MATE, A. 2004. Sanidad y problemas de ombligo. Venezuela. Bovina. 55: 26-29.
- BLOOD, D.; RADOSTITS, O. 2002. Enfermedades del ombligo. En: Tratado de las enfermedades del ganado bovino, ovino, caprino, porcino y equino. Novena edición. España: Ed. Interamericana-McGrawHill; p.180-181.
- DONOVAN, G.A.; DOHOO, R.I.; MONTGOMERY, D.M.; BENNTT, F.L. 1998. Cattle morbidity and mortality: Passive immunity. Prev. Vet. Med. 34(1):31-46.
- FEITOSA, F.L.F.; BIRGEL, E.H.; MIRANDOLA, R.M.S.; PERRI, S.H.V. 2001. Diagnóstico de falha de transferência de imunidade passiva em bezerros através da determinação de proteína total e de suas frações eletroforéticas, imunoglobulinas g e m e da atividade da gama glutamil transferase no soro sanguíneo. Ciência Rural 31(2):251-255.
- GAZQUEZ, A. 1991. Inflamación de los vasos sanguíneos y linfáticos. Patología Veterinaria. España: Editorial Interamericana-McGrawHill. 354p.
- GONÇALVES, R.; KUCHEMUCK, M.; CURI, P.; CHIACCHIO, S.; ALMEIDA, C.; BORGRES, A. 2001. Diferenciação clínica da broncopneumonia moderada e grave em bezerros. Ciênc. Rural. 31:263-269.
- HATHAWAY, S.C.; BULLIANS, J.A.; JOHNSTONE, A.C.; BISS, M.E.; THOMPSON, A. 1993. A pathological and microbiological omphalophlebitis in very young calves slaughtered in New-Zealand. N. Z. Vet. J. 41:166-170.
- JACSON, P. 1999. Treatment of septic arthritis in calves. In Practice. 21:596-601.
- KANOE, M. 1990. *Fusobacterium necrophorum* hemolysin in bovine hepatic abscess. J. Vet. Med. 37:770-773.
- KASARI, T.R.; ROUSSEL, A.J. 1999. Neonatal disease and disease management. In: Howard, J.L.; Smith, R.A. Current veterinary therapy. Food animal practice. 4th ed. Philadelphia: W. B. Saunders, p.62-65.

15. MEDINA, M. 1994. Masas umbilicales. Medicina productiva en la crianza de becerros lecheras. México: Ed. Limusa S.A. p.74-84.
  16. MERCHANT, I.; PACKER, R. 1980. Bacteriología y Virología Veterinarias. España: Ed. Acribia; p. 248-257.
  17. NARONGWANICHGARN, W.; KAWAGUCHI, E.; MISAWA, N.; GOTO, Y.; HAGA, T.; SHINJO, T. 2001. Differentiation of *Fusobacterium necrophorum* subspecies from bovine pathological lesions by RAPD – PCR. Vet. Microbial. 82:383-388.
  18. NEUMAN, A. 1991. El cordón umbilical. Ganado vacuno para producción de carne. México: Ed. Limusa S.A; p.180-181.
  19. OGILVIE, T.H. 2000. Medicina Interna de Grandes Animais. Artes Médicas Sul, Porto Alegre. p.468-470.
  20. RADOSTITS, O.M.; GAY, C.C.; BLOOD, D.C.; HINCHCLIFF, K.W. 2002. Clínica veterinária: um tratado de doenças dos bovinos, ovinos, suínos, caprinos e eqüinos. 9ª ed. Guanabara Koogan, Rio de Janeiro, p.102-136.
  21. RENGIFO, S.A.; SILVA, R.A.; PEREIRA, I.A.; ZEGARRA, J.Q.; SOUZA, M.M.; BOTTEON, R.C.C.M. 2006. Isolamento de agentes microbianos a partir de amostras de sangue e umbigo de bezerros mestiços neonatos. Braz. J. Vet. Res. Anim. Sci. 43(4):442-447.
  22. RINGS, D. 1995. Umbilical hernias, umbilical abscesses, and urachal fistulas. Surgical considerations. Vet. Clin. North Am. Food Anim. Pract.. 11(1):137-148.
  23. SCOTT, P. 1995. Differential diagnosis of recumbency in the neonatal calf. In Practice. 17:162-165.
  24. SHINJO, T. 1983. *Fusobacterium necrophorum* isolated from a hepatic and from mastitis udder secretion in a heifer. Ann. Microbiol. (Inst. Pasteur) 134:401-409.
  25. SMITH, G. 2005. Neonatal calf assessment. Proceeding of the NAVC. North American Veterinary Conference. USA. p.30-31.
  26. SMITH, B.P. 2006. Medicina Interna de Grandes Animais. 3ª Ed. Manole, Barueri, p.255-386.
  27. STAROST, M. 2001. *Haemophilus somnus* isolated from an urachal abscess in a calf. Vet. Pathol. 38(5):547-548.
  28. WATT, A. 1980. Neonatal losses in lambs. In Practice. 2:5-9.
  29. WHITE, D.G. 1993. Colostral supplementation in ruminants. Compend. Cont. Educ. Vet. Pract. 15: 335-34.
- Recibido: Agosto 27 de 2010  
Aceptado: Noviembre 5 de 2011

# DENSIDAD POBLACIONAL Y ESTRUCTURA DE GRUPO DE *Alouatta seniculus* (PRIMATES: ATELIDAE) EN COLOSÓ, SUCRE, COLOMBIA

## POPULATIONAL DENSITY AND GROUP STRUCTURE OF *Alouatta seniculus* (PRIMATES: ATELIDAE) IN COLOSÓ, SUCRE, COLOMBIA

David F. Ochoa<sup>1</sup>, Edwin Martínez<sup>1</sup>, Jaime De La Ossa <sup>2</sup>

<sup>1</sup> Biólogos Universidad de Sucre. <sup>2</sup> Facultad de Ciencias Agropecuarias, Grupo de Investigación en Biodiversidad Tropical, Universidad de Sucre: Carrera 28 N° 5-267, Puerta Roja, Sede Principal, Sincelejo, Sucre, Colombia. [jaimedelaossa@yahoo.com](mailto:jaimedelaossa@yahoo.com).

Rev. U.D.C.A Act. & Div. Cient. 14(2): 101 - 108, 2011

### RESUMEN

En este estudio, se determinó la densidad poblacional y la estructura de grupo para una población de *Alouatta seniculus* (L. 1766) (Primates: Atelidae), asentada en una zona fragmentada de los arroyos Colosó y Sereno, del Municipio de Colosó, en el Departamento de Sucre, Colombia. La zona de estudio, se ubicó en los Montes de María, formación de bosque seco tropical, que conforma un relictus en el cinturón árido Pericaribeño. Se aplicó el método seguimiento continuo, con 84 salidas de campo durante un año, entre 2009 y 2010. Se registraron 22 grupos en total, con una densidad de 52,4 Ind./km<sup>2</sup> y de 8,7 Grupos/km<sup>2</sup>. La proporción entre machos y hembras fue de 1:1. Las variables poblacionales analizadas concuerdan con los rangos establecidos para la especie, pero difieren en cuanto a densidad y estructura de grupo con trabajos previos, llevados a cabo en la zona. Se evidencia un modelo socioecológico, que favorece el incremento de la densidad, mediante la conformación de múltiples grupos de menor tamaño.

Palabras clave: *Alouatta seniculus*, densidad, estructura grupal, Sucre, Colombia.

### SUMMARY

The populational density and group structure for a *Alouatta seniculus* (Primates: Atelidae) population seated in a fragmented area of the Colosó and Sereno streams in the

Municipality of Colosó, Department of Sucre, Colombia, was determined. The study area was located in Montes de Maria, dry tropical dry formation that structure a relictus in the arid Caribbean region. The method of continuous pursuits was applied during 84 field days during one year, between 2009 and 2010. Twenty two groups in total, with a density of 52.4 Ind. /km<sup>2</sup>, and of 8.7 Groups/km<sup>2</sup> were registered. The proportion between males and females was 1:1. The populational variables analyzed agree with the established ranges for the species, but they differ for density and group structure according to previous studies carried out in the area. A socioecological model was evidenced, favoring the density increase through the conformation of multiple smaller sized groups.

Key words: *Alouatta seniculus*, density, group structure, Sucre, Colombia.

### INTRODUCCIÓN

Colombia es el quinto país con mayor diversidad de primates del nuevo mundo, presentando 12 de los 16 géneros existentes, distribuidos desde el nivel del mar hasta los 3.200msnm (Defler, 2003). No obstante, la transformación de hábitat y el acrecentamiento de la frontera agrícola muestran su impacto. Es así como en la región Caribe, la antigua y la amplia cobertura de bosque seco tropical hoy corresponde, en su mayoría, a etapas sucesionales secundarias y sabanas antrópicas, con pequeños parches boscosos (Andrade & Mejía, 1998), afectando las poblaciones silvestres naturales

y, entre ellas, a los primates, como sucede en todo el Neotrópico (Neville, 1976; Thorington & Heltne, 1976; Defler, 1981; Stoner, 1994).

Con los procesos de fragmentación, las especies típicas del bosque quedan aisladas y su supervivencia obedece a la dinámica poblacional, a nivel del fragmento. Así, a escala local, el efecto del tamaño del fragmento, el efecto de borde y el efecto del aislamiento son los principales mecanismos de extinción poblacional; al quedar confinada a un fragmento, la probabilidad de una especie de persistir dependerá del tamaño y de la dinámica de la población; mientras más pequeña sea la población, mayor será su probabilidad de extinguirse (Kattan & Álvarez-López, 1996). En Sur América y en Colombia *Alouatta seniculus* es considerado en la categoría de bajo riesgo-preocupación menor (LR), especie que es capaz de persistir en bosques degradados y fragmentos (Defler, 2003).

De forma específica, los factores que afectan las poblaciones de *A. seniculus*, son: alteración del hábitat, con el consecuente aislamiento en parches de bosque y con limitaciones de alimentos; crecimiento reducido y baja resistencia a enfermedades, lo que puede, eventualmente, llegar a declinar poblacionalmente (Hershkovitz, 1949; Heltne *et al.* 1976); sin embargo, se le reconoce por su gran habilidad para sobrevivir en ambientes degradados, es altamente adaptable y capaz de utilizar pequeños parches de bosque de crecimiento secundario (Hernández-Camacho & Cooper, 1976). Varias especies de primates están predispuestas a un incremento en su riesgo de extinción cuando sus hábitats se han modificado (Chapman & Peres, 2001); muchas especies de Primates presentan una gran plasticidad ecológica, la fragmentación de su hábitat los hace vulnerables al parasitismo y enfermedades, depredación y depresión genética (Bicca-Marques, 2003).

*Alouatta seniculus* es el primate de más amplia distribución en Colombia. Originalmente, se le reporta en todo el país, a excepción de la costa Pacífica, el desierto de la península de la Guajira y el suroccidente de los Andes (Nariño). Esta especie ocupaba todos los rangos altitudinales de la cordillera hasta los 3.200 msnm (regiones montañosas ubicadas sobre el nivel del bosque nublado) y la Sierra Nevada de Santa Marta (Hernández-Camacho & Cooper, 1976). En los Montes de María (Sucre), no se ha mantenido un continuo estudio o monitoreo de sus poblaciones, a pesar de contar con la Estación Primatológica de Colosó; los últimos estudios reportados corresponden, principalmente, a la década comprendida entre 1986 y 1996 (Cuervo *et al.* 1986; Fajardo & De La Ossa, 1994; De La Ossa & Fajardo, 1996).

En este trabajo, se determinan aspectos poblacionales de

los grupos de *A. seniculus* presentes en los arroyos Colosó y Sereno, que hacen parte de la Reserva Forestal Protectora Serranía de Coraza y Montes de María, abordando un estudio de densidad y de composición de grupo, dentro de una matriz boscosa, que acusa una alta intervención y que se estructura, mayoritariamente, en parches de crecimiento secundario.

## MATERIALES Y MÉTODOS

**Área de estudio:** Departamento de Sucre, municipio de Colosó (9°35' N, 9°26' S, 75°22' E y 75°25' O). Puntualmente, en los arroyos Colosó y Sereno, que discurren a lo largo de la zona limítrofe con la ladera Sur de la serranía de San Jacinto (9°30' N y 75°22' O). Ecológicamente, esta zona constituye un relicto de transición de bosque seco Premontano a bosque seco Tropical, con una altura máxima de 300msnm, una temperatura media anual de 27°C y una pluviometría que alcanza los 1.200mm anuales, lo que determina dos épocas climáticas al año: lluviosa, desde mediados de abril hasta finales de noviembre; seca, desde diciembre hasta comienzos de abril (IGAC, 1969; Cuervo *et al.* 1986).

**Fase preliminar:** Se realizó el reconocimiento del área donde se localizaban los grupos o manadas a estudiar, utilizando seguimiento continuo (Altmann, 1974), se geoposicionaron los dormideros y los lugares de alimentación y descanso (GPS Garmin 12X). Se trabajó con un esfuerzo total de 173 horas, correspondientes a 24 días de muestreo, ocho días continuos por cada fragmento, entre las 05:00 y 18:00 horas, con promedio de 7,2 horas/día.

La zona de estudio, se dividió en tres fragmentos de bosque, identificadas como A, B y C. Los dos primeros ubicados en el arroyo Colosó y el tercero conformado por ambos cuerpos de agua. Cada fragmento tuvo un área de: A= 0,39 km<sup>2</sup>, B= 0,60 km<sup>2</sup>, y C= 1,55 km<sup>2</sup> (Figura 1, Tabla 1).

**Fase de campo:** El estudio, se llevó a cabo entre mayo de 2009 y abril de 2010, con 84 días de campo. Se trabajó una semana por mes con seguimiento continuo (Altmann, 1974) durante la fase diurna (06:00 a 16:00 horas), con promedio de 7,45 horas de trabajo/día, para un total de 626 horas de esfuerzo muestral, en un área total de 2,14 km<sup>2</sup> (214 ha).

**Estimación de la densidad:** Se efectuó mediante conteo directo de los individuos y grupos en cada fragmento, teniendo en cuenta el tamaño manejable del área total (Cuervo *et al.* 1986; Fajardo & De La Ossa, 1994; De La Ossa & Fajardo, 1996). Las diferencias individuales, se establecieron teniendo en cuenta características morfológicas visibles,

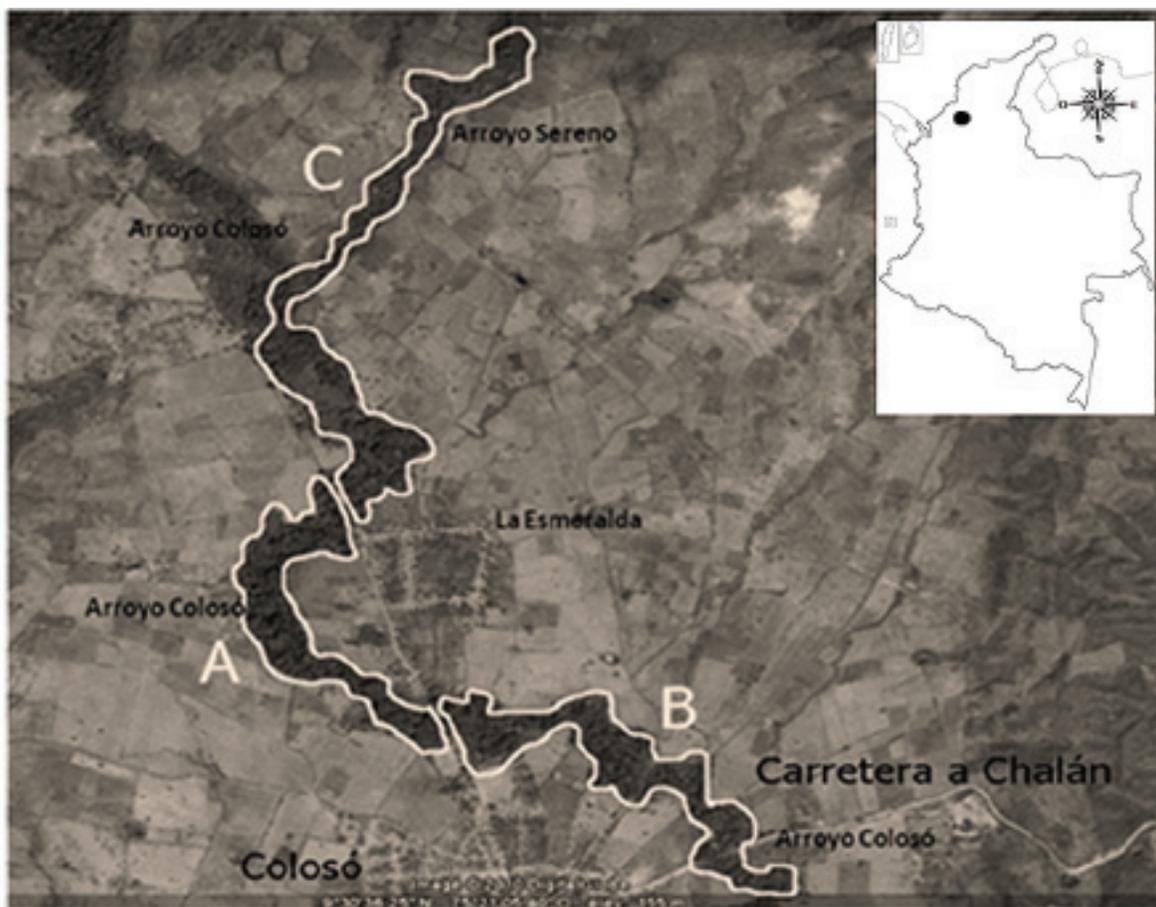


Figura 1. Imagen satelital de los fragmentos de bosques estudiados en Colosó, Sucre, Colombia (Google Earth 5.0 Free,

Tabla 1. Abundancia y densidad de *A. seniculus* en los tres fragmentos de los arroyos Colosó y Sereno.

Fragmento	No. de individuos	No. de grupos	Área (km <sup>2</sup> )	Densidad (Ind./km <sup>2</sup> )	Densidad (Grupos/km <sup>2</sup> )	Esfuerzo muestreo (horas)
A	36	7	0,39	92,3	17,9	228
B	70	10	0,60	116,7	16,7	265
C	27	5	1,55	17,4	3,2	133
Total	133	22	2,54	52,4	8,7	626

mediante binoculares, tales como: patrones de coloración de la espalda, cola y extremidades, cicatrices, forma de las cejas y despigmentación o manchas (Escobedo-Morales & Mandujano, 2007); además, se tuvo en cuenta la localización espacial de las tropas (De La Ossa & Fajardo, 1996). La densidad de población fue calculada como densidad cruda o absoluta: el número de individuos dividido por el área total de la localidad (Soini, 1992).

**Estructura y composición de los grupos:** Durante el conteo de los grupos, se registró el número de individuos en cada tropa, teniendo en cuenta estado de madurez y el sexo, tomando como estadios: hembra y macho, para adultos y juvenil e infante, para inmaduros (Defler, 1981; Soini, 1992). Para la diferenciación de ambos sexos, se tuvo en cuenta el dimorfismo de los genitales externos y para determinar a las hembras, la presencia de crías o la lactancia; para diferenciar

a los juveniles de los infantes, se observó la dependencia relativa materna (Defler, 1981; Cuervo *et al.* 1986; Soini, 1992).

**Tratamiento de la información:** Para analizar, si cada una de las variables evaluadas presentaba diferencias significativas entre los tres fragmentos, se hizo ANOVA y pruebas de Kruskal Wallis (Zar, 1996). Para el análisis e interpretación de los resultados obtenidos durante la investigación, se organizaron tablas y gráficas.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En total, se registraron 22 grupos de *A. seniculus*. La densidad general, se calculó en 52,4 Ind./km<sup>2</sup>, con una participación de 8,7 grupos/km<sup>2</sup>. Las variaciones numéricas entre fragmentos, se exponen en la tabla 1. Al comparar estadísticamente los resultados poblacionales entre áreas, se determinó que existe diferencia significativa ( $p < 0,05$ ).

El tamaño promedio de las tropas fue de  $6,0 \pm 2$  y varió desde tres hasta once individuos (Tabla 2). La composición media por sexos y por edad fue de 30,1%, machos adultos; 34,6%, hembras adultas; 6,8%, machos juveniles; 8,3%, hembras juveniles y 16,5%, infantes. Los grupos poseían de uno a tres machos adultos, una a cinco hembras adultas y de uno a tres individuos inmaduros (juveniles e infantes). En general, se halló igual proporción de hembras y de machos por grupo (1:1) ( $p < 0,05$ ). La distribución por estado de madurez y de sexo, no tuvo variación entre fragmentos, en su orden: machos: hembras: infantes, hallada fue: fragmento A: 4,7: 3,3: 2; fragmento B: 3,4: 4,6: 2; fragmento C: 4,4: 4,8: 0,8.

La densidad hallada en este estudio, se halla dentro de los rangos reportados para la especie (Neville *et al.* 1976; Gaulin & Gaulin, 1982; Crockett & Eisenberg, 1987; Stevenson, 1991; Soini, 1992; Morales-Jiménez, 2002; Defler, 2003). En general, pueden existir variaciones en los rangos de

Tabla 2. Tamaño y composición de los grupos de *A. seniculus* en los tres fragmentos de los arroyos Colosó y Sereno.

Grupo	Adulto		Juvenil		Infante	Total Ind./grupo	Total Ind./fragmento
	♂	♀	♂	♀			
A1	1	1	2	1	1	6	
A2	2	2		1	2	7	
A3	3					3	
A4	3	3			1	7	
A5	2	1			1	4	
A6	3					3	
A7	1	2		1	2	6	36
B1	1	2			1	4	
B2	2	3	1	2	2	10	
B3	2	2	2		1	7	
B4	2	5	1		3	11	
B5	2	3				5	
B6	2	3	1		2	8	
B7	2	2		2	2	8	
B8	3	2			1	6	
B9	1	2		1	1	5	
B10	2	3			1	6	70
C1	3	2		1	1	7	
C2	1	2				3	
C3	1	2	1		1	5	
C4	3	2		2		7	
C5	2	2	1			5	27
Total	44	46	9	11	22	133	
Media Ind./grupo	2,0	2,3	1,3	1,4	1,4	6,0	

densidad, estas diferencias se atribuyen a factores de calidad de hábitat (Cuervo *et al.* 1986; Defler, 1981).

Los resultados para el mismo lugar y con la misma aplicación metodológica muestran, en un lapso de 15 años, un incremento de la densidad del 133,2%, tomando en cuenta el último reporte llevado a cabo por Fajardo & De La Ossa (1994), en donde se estableció una densidad de 22,47 Ind./km<sup>2</sup>.

Se sugiere que en áreas fragmentadas, las altas densidades de primates son producto del hacinamiento de la población al reducirse su área de ocupación original (Defler, 1981). Por otro lado, factores sociales, como la época de violencia vivida en la zona y que concuerda casi con el lapso de 15 años, entre los datos analizados, creó un ambiente de menor impacto antrópico sobre las poblaciones objeto de estudio; cabe resaltar que no se tienen evidencias históricas ni actuales de cacería o de utilización de esta especie en la zona (Cuervo *et al.* 1986; Fajardo & De La Ossa, 1994). No hubo un incremento significativo del área boscosa, pero sí una menor o casi nula circulación humana y se detuvo la extracción de maderas y la ampliación de áreas agrícolas. *A. seniculus* usualmente desaparece en áreas donde existen profundos disturbios en el hábitat, pero es considerado adaptable a la intromisión humana (Hernández-Camacho & Cooper, 1976).

Igualmente, aspectos como la tala de bosques restringe *A. seniculus* a los parches remanentes de bosque, lo cual, podría generar una importante concentración poblacional (Neville, 1976; Neville *et al.* 1976; Peres, 1990; Crockett, 1998; Laurance *et al.* 2002). Altas densidades de *A. seniculus* que habitan parches de bosques también se asocian a la restricción que impone la fragmentación y que impide la dispersión de los individuos jóvenes (Gómez-Posada *et al.* 2005; Valderrama & Kattan, 2006); ahora, si los fragmentos mantienen su productividad, la capacidad de carga se estabiliza alcanzando su máxima expresión, mostrando la densidad una relación directa con las estructuras antrópicas existentes para el lugar (Estrada & Coates-Estrada, 1988; Valderrama & Kattan, 2006).

Por otro lado, es importante resaltar que este hallazgo, en el que la estrategia está dada por el incremento de grupos y no por el tamaño del grupo, permite aceptar la existencia de un modelo de dispersión *in situ* para *A. seniculus*, que brinda una mayor eficiencia en el aprovechamiento de los recursos disponibles y en el mantenimiento de la población.

Puesto que en Primates los grupos grandes invierten mayor tiempo en forrajeo, hacen recorridos mayores, las tasas

de agresión intragrupal se incrementan y se aumenta el esfuerzo de crianza, en tal sentido, serían ecológicamente menos eficientes (Terborgh & Janson, 1986; Izawa, 1988; Janson, 1988; Janson & van Schaik, 1988; Lee, 1994; Janson & Goldsmith, 1995; van Schaik, 1989), pudiéndose aceptar que, ante la limitación de hábitat para *A. seniculus*, sería más eficiente un modelo caracterizado por la presencia de múltiples grupos pequeños, que le permitan maximizar su eficacia.

La composición macho: hembra de los grupos estudiados es proporcionalmente menor a la reportada para esta especie tanto en hábitats similares como diferentes (<biblio>). Por lo general, se espera una ligera mayor proporción de hembras adultas que de machos adultos, (Defler, 1981; Gómez-Posada *et al.* 2009). Este trabajo no determinó una diferencia significativa entre la proporción de hembras y de machos, como existe en otros reportes (Izawa, 1988; Soini, 1992), pero se asemeja a lo establecido para la misma zona de estudio en cuanto al tamaño promedio del grupo y a la proporción entre sexos (Fajardo & De La Ossa, 1994), datos que están de acuerdo con lo establecido por diversos autores para Perú y para Colombia (Freese, 1975; Klein & Klein, 1976; Neville *et al.* 1976).

Como lo plantean Valderrama & Kattan (2006), la similitud de proporción entre sexos para esta especie puede ser explicada, porque el número de hembras adultas es el factor que, al parecer, limita el tamaño del grupo; las hembras adultas regulan su número expulsando a las hembras jóvenes; las tropas con muchas hembras adultas, atraen en mayor proporción machos solitarios que intentan ingresar al grupo y derrotar al macho dominante, generando cambios en la estructura y en la estabilidad social de la manada. Se podría explicar como una consecuencia del incremento del número de grupos que, comparativamente, se registró en este trabajo; esto evidenciaría la importancia de las interacciones sociales y las condiciones ecológicas (Winterhalder & Smith, 1992); en este caso, las estrategias sociales se pueden relacionar con soluciones adaptativas a ciertas condiciones ecológicas específicas, como la limitación de hábitat (Chan, 1996) y que se hacen notorias en la organización social (Sterck *et al.* 1997).

Es evidente que se presentó un cambio histórico que favoreció la densidad poblacional para el área de estudio; sin embargo, el tamaño y la composición del grupo no manifiestan mudanzas significativas; se trata, entonces, de un incremento del número de grupos bajo la misma estructura poblacional. Durante estos 15 años, se han conformado nuevas manadas dentro de la misma área de estudio, lo que determina el incremento de la densidad poblacional. Es necesario continuar evaluando esta zona, en particular

para determinar los umbrales de tolerancia de la especie con relación a los efectos de borde, aislamiento y tamaño de los fragmentos, y a los factores antrópicos asociados (Roncancio *et al.* 2010).

La información analizada no permite aseverar que la población se encuentre en riesgo de extinción local; se puede asegurar la existencia de una recuperación numérica importante, pero queda por definir la tolerancia de la capacidad de carga existente; es importante calcular su umbral máximo, conocer si ya llegó a su límite y qué podría suceder a futuro con esta área de fragmentos boscosos, que hacen parte de una Reserva Forestal Protectora de bosque seco tropical, remanente para el Caribe colombiano.

Conflicto de intereses: El manuscrito fue preparado y revisado con la participación de todos los autores, quienes declaramos que no existe ningún conflicto de intereses que ponga en riesgo la validez de los resultados presentados. Financiación: Este estudio fue financiado con aportes del Grupo de Investigación en Biodiversidad Tropical de la Universidad de Sucre, Colombia.

## BIBLIOGRAFÍA

1. ALTMANN, J. 1974. Observational study of behavior sampling methods. *Behaviour*. 49(3-4):227-267.
2. ANDRADE, G.I.; MEJÍA, C. 1998. Cambios estacionales en la distribución de la avifauna terrestre en el Parque Nacional Natural Macuira, Guajira, Colombia. *Trianea*. 1:145-169.
3. BICCA-MARQUES, J.C. 2003. How do howler monkeys cope with habitat fragmentation? En: *Primates in fragments, ecology and conservation*. En: Marsh, L.K. ed. Kluwer Academy/Plenum Publishers. p.283-303.
4. CHAN, L.K.W. 1996. Phylogenetic interpretations of primate socioecology: With special reference to social and ecological diversity in *Macaca*. En: Martins, E.P. ed. *Phylogenies and the Comparative Method in Animal Behavior*. Oxford University Press (New York). p.324-360.
5. CHAPMAN, C.; PERES, C. 2001. Primate conservation in the new millennium. The role of scientists. *Evol. Anthropol.* 10:16-33.
6. CROCKETT, C.; EISENBERG, J. 1987. Howlers: variations in group size and demography. En: Smuts, B.; Cheney, D.; Seyfarth, R.; Wrangham, R.; Struhsaker. T. eds. *Primate Societies*. The University of Chicago Press (Chicago). p.54-68.
7. CROCKETT, C. 1998. Conservation biology of the Genus *Alouatta*. *Int. J. Primatol.* 19(3):549-578.
8. CUERVO, A.; BARBOSA, C.; DE LA OSSA, J. 1986. Aspectos ecológicos y etológicos de primates con énfasis en *Alouatta seniculus* (CEBIDAE) de la Región de Colosó, Serranía de San Jacinto (Sucre) Costa Norte Colombiana. *Caldasia*. XIV:68-70.
9. DE LA OSSA, J.; FAJARDO, P.A. 1996. Densidad del mono aullador *Alouatta seniculus* (Linnaeus, 1766) Mammalia: Primates. En el arroyo Colosó, Departamento de Sucre, Colombia. *Acta Biol. Col.* 3:43-52.
10. DEFLER, T. 1981. The density of *Alouatta seniculus* in the eastern llanos of Colombia. *Primates*. 22:564-569.
11. DEFLER, T. 2003. *Primates de Colombia. Serie de guías tropicales de Colombia 4. Conservación Internacional*. Bogotá, Colombia. 543p.
12. ESCOBEDO-MORALES, L.; MANDUJANO, S. 2007. Viabilidad metapoblacional del mono aullador (*Alouatta palliata mexicana*) en un paisaje altamente fragmentado de los Tuxtlas, México. En: Harvey, C.A.; Sáenz, J.C. eds. *Evaluación y Conservación de biodiversidad en paisajes fragmentados Mesoamericanos*. INBIO, CATIE, UNA (Costa Rica). p.421-450.
13. ESTRADA, A.; COATES-ESTRADA, R. 1988. Tropical rain forest conversion and perspectives in the conservation of wild primates (*Alouatta* and *Ateles*) in México. *Am. J. Primatol.* 14:315-327.
14. FAJARDO, P.A.; DELA OSSA, J. 1994. Censo Introductorio de primates en la reserva forestal protectora Montes de María y Serranía de Coraza, Sucre - Colombia. *Trianea*. 5:289-303.
15. FREESE, C.H. 1975. A census of non human primates in Perú. En: Project AMOR-0719. ed. *Censusing Studies in Perú and Colombia. Report to National Academy of Sciences on Pan American Health Organization* (Washington). p.17-41.
16. GAULIN, S.; GAULIN, C. 1982. Behavioral ecology of *Alouatta seniculus* in Andean Cloud Forest. *Int. J. Primatol.* 3(1):1-29.

17. GÓMEZ-POSADA, C.; RONCANCIO, N.; HINCAPIÉ, P.; BETANCOURT, A. 2005. Densidad y composición de grupos en tres poblaciones de mono aullador rojo (*Alouatta seniculus*) en Valle y Cauca, Colombia. Bol. Cient. Mus. Hist. Nat. 14(1):79-91.
18. GÓMEZ-POSADA, C.; ÁLVAREZ, Z.; GIRALDO-CHAVARRIAGA, P. 2009. Densidad y estatus poblacional de monos aulladores rojos en un guadual, fragmento aislado, La Tebaida, Quindío, Colombia. Universitas Scientiarum. 14(1):8-15.
19. HELTNE, D.; TURNER, D.; SCOTT, N. 1976. Comparison of census on *Alouatta palliata* from Costa Rica and Panamá. En: Thorington, R.W.; Heeltne, P.G. eds. Neotropical Primates: Field Studies and Conservation. National Academy of Sciences (Washington). p.10-19.
20. HERNÁNDEZ-CAMACHO, J.; COOPER, R.W. 1976. The nonhuman Primates of Colombia. En: Thorington, R.W.; Heeltne, P.G. eds. Neotropical Primates: Field Studies and Conservation. Nal Acad. Sci. (Washington). p.35-69.
21. HERSHKOVITZ, P. 1949. Mammals of northern Colombia. Preliminary report No.4: Monkeys (Primates), with taxonomic revisions of some forms. Proc. U. S. National Museum. 98:323-427.
22. IGAC. 1969. Monografía del departamento de Sucre. Oficina de estudios Geográficos. Instituto Agustín Codazzi (Bogotá, Colombia). 65p.
23. IZAWA, K. 1988. Preliminary reports on social changes on red howlers (*Alouatta seniculus*). Field Studies of New World Monkeys. La Macarena. 1:29-33.
24. JANSON, C.H.; GOLDSMITH, M.L. 1995. Predicting group size in primates: Foraging costs and predation risks. Behav. Ecol. 6:326-336.
25. JANSON, C.H. 1988. Intra-specific food competition and primate social structure: A synthesis. Behaviour. 105:1-17.
26. JANSON, C.H.; VAN SCHAIK, C. 1988. Recognizing the many faces of primate food competition: Methods. Behaviour. 105:165-186.
27. KATTAN, G.; ÁLVAREZ-LÓPEZ, H. 1996. Preservation and management of biodiversity in fragmented landscape in the Colombian Andes. En: Schelhas, J.; Greenberg, R. eds. Forest patches in tropical landscape. Island Press (Washington). p.3-18.
28. KLEIN, L.L.; KLEIN, D.J. 1976. Neotropical Primates: aspects of habitat usage, population density, and regional distribution in La Macarena, Colombia. En: Thorington, W.; Heltne, P.G. eds. Neotropical primates: Field studies and conservation. National Academy Press (Washington). p.70-78.
29. LAURANCE, W.; LOVEJOY, T.; VASCONCELOS, H.; BRUNA, E.; DIDHAM, R.; STOUFFER, P.; GASCON, C.; BIERREGAARD, R.; LAURANCE, S.; SAMPAIO, E. 2002. Ecosystem decay of Amazonian forest fragments: a 22-year investigation. Conserv. Biol. 16:605-618.
30. LEE, P.C. 1994. Social structure and evolution. En: Slater, P.B.; Halliday, T.R. eds. Behaviour and Evolution. Cambridge University Press (Cambridge). p.266-303.
31. MORALES-JIMÉNEZ, A.L. 2002. Densidad de los monos aulladores (*Alouatta seniculus*) en un bosque subandino, Risaralda, Colombia. Neotrop. Primates. 10(3):141-144.
32. NEVILLE, M.K. 1976. *Alouatta seniculus*. The population and conservation of howler monkeys in Venezuela. En: Thorington, R.W.; Heltne, P.G. eds. Neotropical Primates: Field studies and Conservation. Nal Acad. Sci. (Washington). p.101-109.
33. NEVILLE, M.K.; CASTRO, N.; MARMOLA, A.; REVILLA, J. 1976. Censusing primate population in the Reserve area of the Pacaya and Samiria Rivers, Department of Loreto, Perú. Primates. 17:151-181.
34. PERES, C.A. 1990. Effects of hunting on western Amazonian primate communities. Biol. Cons. 54:47-59.
35. RONCANCIO, N.J.; GARCÍA, L.M.; ACOSTA, A. 2010. Densidad poblacional y estructura de grupo de *Ateles hybridus brunneus* (Primates: Atelidae) en un fragmento de bosque aislado en el suroriente de Antioquia, Colombia. Mastozoología Neotrop. 17(2):385-389.
36. SOINI, P. 1992. Ecología del coto mono (*Alouatta seniculus*, Cebidae) en el río Pacaya, Reserva nacional Pacaya-Samiria, Perú. Folia Amazónica. 4(2):103-118.
37. STERCK, E.H.M.; WATTS, D.P.; VAN SCHAIK, C.P. 1997. The evolution of female social relationships in nonhuman primates. Behav Ecol Sociobiol. 41:291-309.

38. STEVENSON, P. 1991. Relación entre la abundancia de frutos y las estrategias alimenticias de 4 especies de primates, en la Macarena - Colombia. Fundación para la Promoción de la Investigación y la Tecnología Banco de la República. Bogotá, Colombia. 209p.
39. STONER, K.E. 1994. Population Density of the Mantled Howler Monkey (*Allouatta palliata*) at La Selva Biological Reserve, Costa Rica: A new Technique to Analyze Census Data. *Biotropica*. 26(3):332-340.
40. TERBORGH, J.; JANSON, C.H. 1986. The socioecology of primate groups. *Ann. Rev. Ecol. Syst.* 17:111-136.
41. THORINGTON, R.W.; HELTNE, P.G. 1976. Introduction. En: Thorington, R.W.; Heltne, P.G. eds. *Neotropical Primates: Field Studies and Conservation*. Nat Acad. Sci. (Washington). p.1-3.
42. VALDERRAMA, C.; KATTAN, G. 2006. Plan de manejo del mono aullador rojo (*Alouatta seniculus*) en la región del Sirap. Eje Cafetero y valle del Cauca. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt y Fundación EcoAndina/WCS Colombia (Bogotá). 115p.
43. VAN SCHAIK, C.P. 1989. The ecology of social relationships amongst female primates. En: Standen, V.; Foley, R.A. eds. *Comparative Socioecology of Mammals and Humans* (Oxford). p.195-218
44. WINTERHALDER, B.; SMITH, E.A. 1992. Evolutionary ecology and the social sciences. En: Smith, E.A.; Winterhalder, B. eds. *Evolutionary Ecology and Human Behavior* (New York). p.3-24.
45. ZAR, J.H. 1996. *Bioestatistical Analysis*. 3rd edition. Prentice-Hall, Inc. (Englewood Cliff, N.J). 663p.

Recibido: Agosto 3 de 2011

Aceptado: Octubre 9 de 2011

# **BIOECOLOGÍA DE LA RAYA DE AGUA DULCE *Potamotrygon magdalanae* (Duméril, 1865) (MYLIOBATIFORMES) EN LA CIÉNAGA DE SABAYO, GUAIMARAL, COLOMBIA**

## **BIOECOLOGY OF THE FRESHWATER STINGRAY *Potamotrygon magdalanae* (Duméril, 1865) (MYLIOBATIFORMES) FROM THE CIÉNAGA DE SABAYO, GUAIMARAL, COLOMBIA**

Herly Bibiana Ramos-Socha<sup>1</sup>, Marcela Grijalba-Bendeck<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Bióloga Marina, heraso43@gmail.com <sup>2</sup> Bióloga Marina, Profesora Asociada Programa de Biología Marina marcela.grijalba@utadeo.edu.co. Facultad de Ciencias Naturales e Ingeniería, Departamento de Ciencias Biológicas y Ambientales, Programa de Biología Marina, Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano. Edificio Mundo Marino, Carrera 2 No. 11-68, Rodadero-Santa Marta, Magdalena, Colombia.

Rev. U.D.C.A Act. & Div. Cient. 14(2): 109 - 118, 2011

### **RESUMEN**

A pesar de la representatividad de *Potamotrygon magdalanae* en Colombia, por encontrarse a lo largo de la cuenca del río Magdalena y sus afluentes, esta raya no ha sido objeto de estudios previos, desconociéndose la mayor parte de sus aspectos bio-ecológicos. Actualmente son capturadas, incidentalmente, por la pesca artesanal que se efectúa en la Ciénaga de Sabayo (Guaimaral, Magdalena), donde no se les da ningún aprovechamiento. Se examinaron 488 individuos de *P. magdalanae*, capturadas entre octubre 2007 y mayo 2008, empleando chinchorro y trasmallo. Se estimó su captura por unidad de esfuerzo en  $1,43 \pm 0,37$  ind/h, faena para trasmallo y  $59,30 \pm 9,00$  ind/h, para chinchorro y una biomasa  $0,38 \pm 0,06$ kg/h y  $81,70 \pm 13,30$ kg/h, respectivamente. La talla media de madurez fue 240mm ancho de disco en hembras y 202 en machos; la talla mínima de madurez, se estimó en 164, hembras y 160, machos. El ovario derecho en hembras, se registró con menor desarrollo que el izquierdo, ambos úteros fueron funcionales, conteniendo entre 1 y 5 embriones, los cuales, nacen con tallas entre 87 y 95mm AD. Se registraron 39 estómagos vacíos (14,6%) y 227 con algún contenido (85,3%), siendo Polymitarciidae (55,6%) y sus larvas (30,8%) las de mayor representatividad, indicando que *P. magdalanae* es una especie bentónica insectívora detritívora.

Palabras clave: Potamotrygonidae, raya dulceacuícola, biología, pesquerías, Magdalena, Colombia.

### **SUMMARY**

One of the most abundant fishes in Colombia is *Potamotrygon magdalanae*, from the Magdalena River and its tributaries, however, no previous studies on this species exist, unknowing therefore the main bio-ecological aspects. No commercial interest exists on this ray that is caught as bycatch by artesian fishery at Ciénaga de Sabayo (Guaimaral, Magdalena). Between October (2007) and May (2008) 488 individuals of *P. magdalanae* were captured using gillnet and trawl net. The catch per unit effort was calculated as  $1.43 \pm 0.37$  ind/h for gillnet and  $59.30 \pm 9.00$  ind/h for trawl net, and for biomass estimation  $0.38 \pm 0.06$ kg/h and  $81.70 \pm 13.30$ kg/h, respectively. Medium maturity size was estimated as 240mm disk width for females and 202mm for males, while minimum maturity size was 164mm (females) and 160mm (males). The right ovary of females was less developed than the left one, both uterus were functional containing 1 to 5 embryos, which birth size was estimated between 87 and 95mm AD. A total of 39 empty stomachs were registered (14,6%), and food content was observed on 227 (85,3%). Polymitarciidae (55,6%) and its larvae (30,8%)

were the most important preys, indicating that *P. magdalenae* is an insectivore and detritivore benthonic species.

Key words: Potamotrygonidae, freshwater stingray, biology, fishery, Magdalena, Colombia.

## INTRODUCCIÓN

Según Nelson (2006), los Myliobatiformes incluyen, entre otras, a la familia Potamotrygonidae Garman, 1977; de los géneros que allí están contenidos, *Paratrygon* y *Potamotrygon* son los únicos representados en aguas colombianas (Puentes *et al.* 2009). Estos abarcan siete especies, cuatro de ellas (*Potamotrygon motoro*, *P. magdalenae*, *P. orbignyi* y *P. schroederi*), actualmente categorizadas con un grado de prioridad de investigación muy alto, considerando la relación con la pesca, el comercio, la distribución y el estadio de conservación, a lo que se suma la escasa información existente (Caldas *et al.* 2010). En el caso particular de *P. magdalenae*, su categoría actual es “Near Threatened NT” (IUCN, 2011), al parecer tiene alta representatividad a lo largo de la cuenca del río Magdalena, sus afluentes y en el río Catatumbo, donde habitan enterradas en la arena del fondo de las áreas ribereñas poco profundas y ciénagas (Gutiérrez *et al.* 2004). No obstante, los individuos de esta especie, capturados incidentalmente por la pesca artesanal en la ciénaga del Sabayo, como en otras localidades (Dahl, 1971) son desechadas, a pesar del aporte nutricional que tienen.

Dada la alta frecuencia y abundancia de la raya de agua dulce *P. magdalenae* en capturas incidentales en la ciénaga de Sabayo (Guaimaral, Magdalena), que contrasta con la falta de información disponible, el presente estudio aporta información pesquera y biológica: abundancia total y relativa, estructura de tallas, talla de madurez sexual, estadio de desarrollo gonadal, fecundidad, índice hepatosomático y gonadosomático, proporción de sexos y factor de condición; además abarca su espectro trófico analizando, cualitativamente, los hábitos alimenticios y sus variaciones espacio-temporales, como un primer aporte al conocimiento de la especie en la región.

## MATERIALES Y MÉTODOS

**Área de estudio:** La ciénaga de Sabayo, se localiza en Guaimaral, corregimiento ubicado en la subregión sur del departamento del Magdalena (9°18'08" N y 74°14'10" O) (Figura 1). Según Villalobos (2006), la ciénaga de Sabayo cuenta con una extensión aproximada de 2km<sup>2</sup> y una profundidad variable (3 a 8m), dependiendo de las épocas climáticas, caracterizadas por presentar dos periodos principales: uno lluvioso, de septiembre a finales de noviembre y uno seco, de noviembre a marzo; posteriormente, se encuentra un periodo menor de lluvias (abril a mayo) y un “veranillo” (mayo a agosto).



Figura 1. Área de estudio, sector de Guaimaral, Inmediaciones del departamento del Magdalena, Colombia. Modificado de Instituto Geográfico Agustín Codazzi, (1996).

**Fase de campo:** Las muestras fueron obtenidas, como pesca incidental de las capturas artesanales, con trasmallo y con chinchorro, las cuales, se analizaron por separado, para los aspectos pesqueros y se integraron, para el análisis del componente biológico. Las muestras procedentes de trasmallo, se tomaron semanalmente, dependiendo de la actividad diaria de los pescadores, durante octubre de 2007 hasta mayo de 2008, extendiendo el arte desde el atardecer hasta la madrugada. El chinchorro empleado, se evaluó a partir de tres faenas efectuadas en marzo y dos en abril y se optó por evaluarlo, debido a la reducida captura de rayas con trasmallo durante la época seca. Una vez obtenida la captura de los dos artes, se separaron los peces óseos de las rayas, estimando, para los primeros, composición y peso total, siendo éste el único registro disponible para el área de estudio.

**Fase de laboratorio:** Se examinaron animales extraídos por los pescadores artesanales de la región, quienes realizaron sus faenas de pesca cotidianas; no se efectuó pesca de investigación, por lo cual, no se requirió permiso de investigación ni aprobación por parte del Comité de Bioética de la Universidad Jorge Tadeo Lozano, para el procesamiento del material.

**Condición reproductiva:** La diferenciación sexual, se realizó teniendo en cuenta la descripción de las características internas y externas de los sistemas reproductivos de hembras (estadio de desarrollo de los ovarios, oviductos, útero y glándula nidamental) y de machos (rigidez y rotación de cláspes, testículos, epidídimo y vesícula) (Grijalba-Bendeck *et al.* 2008). El estadio de desarrollo gonadal, se definió según los criterios de Tresierra & Culquichicón (1993), modificada para *P. magdalenae*. De los embriones, se evaluó número en cada útero, talla y grado de desarrollo, según la escala propuesta por Barbarino & Lasso (2005) y adaptada para el presente estudio.

**Espectro trófico:** Los estómagos de todos los ejemplares, se fijaron (formalina 4%) y se conservaron (alcohol 75%) hasta su posterior análisis en laboratorio. Cada estómago se categorizó, según su grado de llenado y su digestión (Galván *et al.* 1989; Polo-Silva *et al.* 2007) y se cuantificó el número y frecuencia de cada componente alimentario contenido (% FO).

**Análisis de información:** **Aspectos pesqueros:** Se calculó la captura por unidad de esfuerzo (CPUE), en número total de individuos y, biomasa, en kilogramos (kg) de *P. magdalenae* mensualmente, para cada arte por separado, estandarizando el tiempo promedio de cada arte, a 1 hora. Los valores obtenidos, se multiplicaron por diez para tener una exposición más clara de sus fluctuaciones; se calculó el error estándar, como medida de su variabilidad y en histogramas

de frecuencia, se representó la estructura de tallas por sexos. A manera de información complementaria, se cuantificó la representatividad de la ictiofauna ósea, obtenida durante las faenas.

**Aspectos reproductivos:** Se evaluaron todos los estadios de desarrollo gonadal y se realizaron descripciones morfológicas de las diferentes etapas de desarrollo gonadal; sin embargo, para la estimación de la talla media de madurez (TMM), se consideraron únicamente las tallas de los machos en estadio III y IV y IIIa, IIIb y IV, en el caso de las hembras, siguiendo los criterios de Tresierra & Culquichicón (1993) y Arteaga *et al.* (2004), quienes recomiendan considerar sólo los estados gonadales que ya han alcanzado la madurez para el ajuste de los datos obtenidos a la siguiente función:

$$P(l) = [1 / (1 + e^{(a + bl)})]$$

Donde: P es la proporción de individuos maduros, a y b son constantes y l es el intervalo de tallas.

La fecundidad, se halló considerando el número de embriones por útero y el número y promedio de huevos presentes, mensualmente, en cada ovario. Se evaluó la relación entre la talla de las hembras maduras con la talla y número de embriones, según lo propuesto por Babel (1967), a partir de una gráfica de puntos de dispersión. De los embriones, se determinó el peso, el ancho de disco y se tuvo en cuenta la ubicación dentro de los úteros. Se estableció su grado de desarrollo, según Barbarino & Lasso (2005) y modificado para el presente estudio. Debido a que algunos ejemplares llegan sin la cola completa, se tuvo en cuenta la relación peso total y ancho del disco, para calcular el factor de condición, mediante la siguiente ecuación:

$$FC = PT/AD^b * 110$$

Donde: PT es el peso de la raya, AD es el ancho del disco del individuo (mm) y b, el valor de la relación peso-longitud (Tresierra & Culquichicón, 1993).

Se calculó el Índice Gonadosomático (IGS) y el Hepatosomático (IHS), según las expresiones:

$$IGS = (Pg/Pv) * 100$$

Donde: Pg, peso promedio de las gónadas (g) y Pv, peso eviscerado (g).

$$IHS = (Ph/Pv)$$

Donde: Ph es el peso del hígado (g) y Pv, el peso eviscerado del ejemplar (g).

Se determinó la proporción sexual, contabilizando el número de machos y de hembras mensualmente y se expresó, en porcentaje, de la siguiente forma:

$$\% \text{ sexo (machos-hembras)} = (Nm/Nt) * 100$$

Donde: Nm, número de machos o hembras y Nt, número total de individuos.

Evaluando la significancia de la proporción obtenida con Chi cuadrado ( $p > 0.05$ ) (Tresierra & Culquichicón, 1993). Tanto para adultos, como para embriones, se propuso como hipótesis nula que la proporción hembras y machos era 1:1, tal como ocurre para la mayoría de los vertebrados en la naturaleza.

**Aspectos tróficos:** La cuantificación en frecuencia de cada componente alimentario, se realizó según Hyslop (1980), teniendo en cuenta las diferencias por tallas:

$$\%FO = (Ni/NT)*100$$

Donde: FO, frecuencia de ocurrencia de cada componente; Ni, número de tractos conteniendo el mismo componente y NT, número de tractos con alimento.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la ciénaga de Sabayo, tanto el chinchorro como el trasmallo, se emplean para capturar peces comerciales. La captura de rayas, se considera como pesca incidental, los peces óseos obtenidos durante el tiempo de muestreo estuvieron representadas por trece especies y la biomasa de estos siempre fue mayor que la de *P. magdalenae* a lo largo de todo el muestreo, las más representativas fueron: el bocachico – *Prochilodus magdalenae* (51%), pácora – *Plagioscion surinamensis* (25%) y el pincho – *Cyphocharax magdalenae* (9%), las demás presentaron frecuencias bajas. La ictiofauna acompañante de *P. magdalenae* puede variar de acuerdo al lugar de muestreo en la ciénaga del Sabayo; no obstante, se trata de un cuerpo de agua cerrado, con un sustrato fangoso vegetado, en el que se pueden encontrar otros recursos, como cangrejos (*Callinectes* spp.), camarones (*Paeneus* spp. y *Macrobrachium*), roncós (*Bairdiella* sp.) y el bagre pintado (*Pimelodus grosskopfki*), entre otros, que fueron registrados por Yépez & Espinosa (1970), pero no extraídos durante los muestreos realizados.

Se analizaron 488 ejemplares de *P. magdalenae*, 275 machos y 213 hembras; 377 rayas se colectaron empleando trasmallo y 111 con chinchorro. Para el trasmallo, el promedio general de la captura total por unidad de esfuerzo fue

$0,38 \pm 0,06\text{kg/h}$ , el mismo promedio para peces óseos fue  $0,30 \pm 0,06\text{kg/h}$  y  $0,07 \pm 0,02\text{kg/h}$  para rayas. En cuanto al chinchorro, el valor general obtenido fue  $81,70 \pm 13,30\text{kg/h}$ , los peces óseos presentaron un valor promedio de  $55,50 \pm 13,40 \text{ kg/h}$  y la captura de rayas se estimó en  $26,20 \pm 4,60\text{kg/h}$ . En términos de número de rayas, el valor promedio de la CPUE para el trasmallo fue  $1,43 \pm 0,37\text{ind/h}$  y para el chinchorro  $59,30 \pm 9,00\text{ind/h}$ .

Los datos reflejan que la mayor captura de rayas se obtiene con chinchorro en época seca, dado que *P. magdalenae* prefiere fondos de poca profundidad cuando ocurre la disminución en la vegetación acuícola, condiciones que favorecen la captura con este arte, principalmente, entre marzo y abril (Arias, 1993). A medida que se incrementan las lluvias, ocurre el desplazamiento evasivo de las rayas hacia sitios más profundos haciendo ideal el uso del trasmallo, a pesar del incremento de la vegetación acuícola.

La interpretación de estos datos debe ser cuidadosa, debido a que las capturas de peces estimadas para la cuenca Magdalénica no son específicos sobre la inclusión de las especies de rayas, ni se discriminan en biomasa y/o número de individuos; estas capturas oscilan entre 27 y 96kg/día, con un promedio de 47 kg/día en general para todas las artes de pesca y para el trasmallo, de 3kg/h (Arias, 1993). Para la ciénaga de Sabayo, el promedio de CPUE estimado para el trasmallo fue de  $4,00 \pm 0,04\text{kg/día}$  y para el chinchorro de  $10,00 \pm 3,04 \text{ kg/día}$ ; de esta forma, los valores obtenidos en el presente estudio, se pueden considerar representativos y un punto de referencia, debido a que éstos abarcan un área significativamente menor.

El número total de ejemplares analizados ( $n = 488$ ) es alto respecto al evaluado por Teshima & Takeshita (1992), en un arrastre en el río Magdalena, quienes colectaron 117 especímenes (73 machos y 44 hembras), también con relación al estudio de Ramírez-Gil *et al.* (2001), en Inírida – Guainía, donde, con diferentes artes de pesca, colectaron 549 ejemplares de *P. motoro*, en 12 meses.

Se capturaron machos con tamaños desde 96mm AD hasta 278mm y hembras de 82 a 422mm AD. En la estructura de tallas, el intervalo mejor representado para las hembras fue 117 a 131, con marca de clase 124mm, los machos mostraron mayor proporción entre 187 y 201mm, con marca de clase 194mm, seguido de 173 a 187 mm, con marca de clase 180mm. La distribución indicó que las tallas pequeñas tuvieron una elevada frecuencia de captura, lo que puede ser un primer indicio de una presión significativa sobre ejemplares inmaduros, que se puede explicar por el pequeño ojo de malla de los artes que se emplean en la Ciénaga. Por otra parte, se registró como longitudes máximas 278 y 422mm

AD, para machos y hembras, respectivamente. Yépez & Espinosa (1970) registraron tallas de 380 mm AD para machos y 560mm AD para hembras, usando chinchorro para su extracción en Venezuela; este aparejo atrapa rayas de mayor tamaño, ya que *P. magdalenae* es denominada una especie bentónica; las hembras alcanzan tallas y pesos máximos mayores que los machos (Yépez & Espinosa, 1970; Puentes *et al.* 2009), lo que indica que *P. magdalenae* presenta un dimorfismo sexual marcado (Teshima & Takeshita, 1992; Charvet-Almeida *et al.* 2005).

Las hembras inmaduras mostraron tallas entre 80 y 175mm AD, las hembras en maduración entre 110 y 242mm AD y las maduras fluctuaron de 164 a 422mm AD. Los ovarios de *P. magdalenae* se observaron en todos los estadios, pero

el derecho se halló con menor tamaño en hembras maduras (IIIa, IIIb y IV) (Figura 2a-c), coincidiendo con la mayoría de las rayas de agua dulce, (Charvet-Almeida *et al.* 2005) quienes encontraron que solo el ovario izquierdo pareció ser funcional, aunque Teshima & Takeshita (1992) notaron en *P. magdalenae* que, al parecer, ambos ovarios son funcionales; no se descarta que el ovario derecho está en menor desarrollo o, algunas veces, completamente atrofiado (Figura 2a).

La fluctuación temporal de los estadios de desarrollo fue variable durante el tiempo de estudio: el estadio I fue el mejor representado 49% (n = 103), seguido por el estadio IIIa con 17% (n = 36), posteriormente, el estadio II y IIIb, con 13% (n = 26) y, finalmente, el IV, con 8% (n = 16). En este sentido y considerando que *P. magdalenae* en el área de estu-

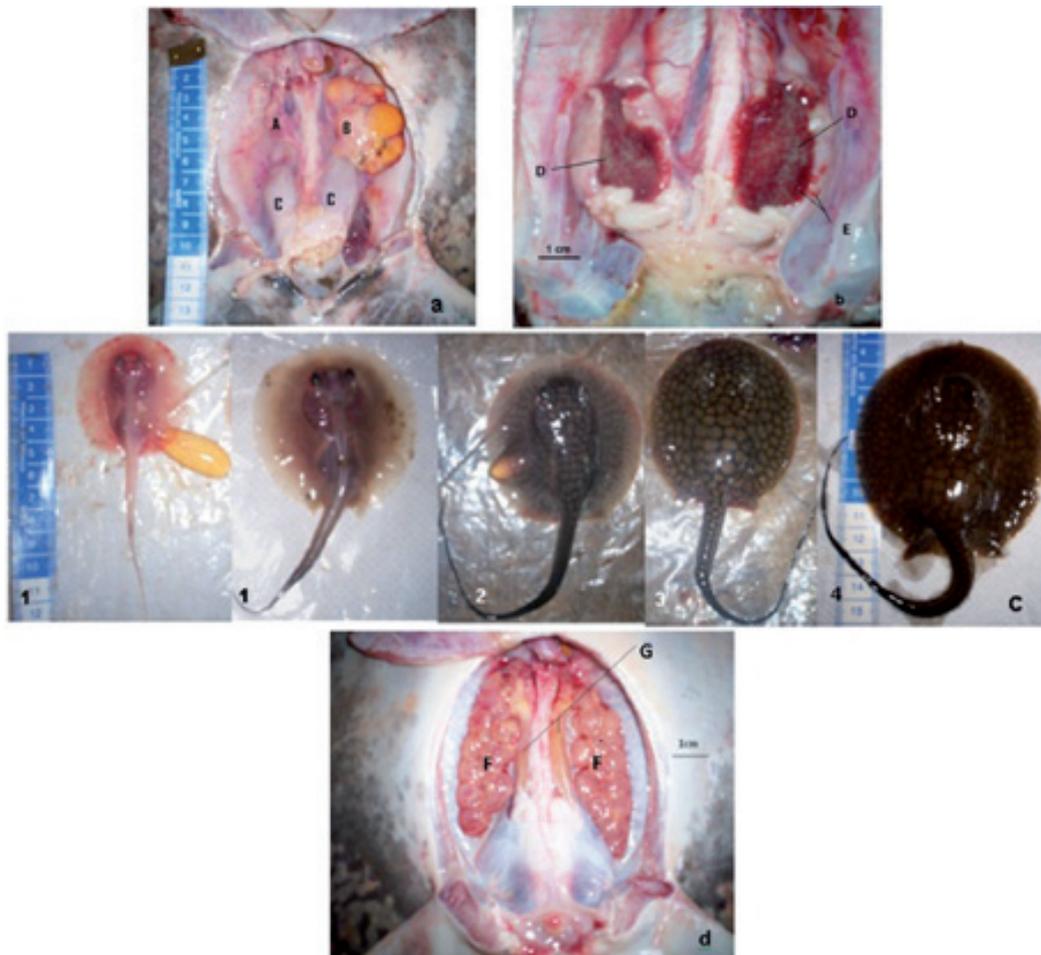


Figura 2. Sistema reproductor de hembras y machos de *Potamotrygon magdalenae*. a. hembra IIIa; b. hembra grávida con los úteros disectados; c. embriones en diferentes estadios de desarrollo; d. testículos de machos maduros. A: Ovario poco desarrollado, B: Ovario funcional, C: Úteros funcionales, D: Leche intrauterina, E: Microvellosidades, F: Testículos maduros y G: Ductos deferentes con epidídimo.

dio mostró todos los estadios de madurez sexual a lo largo del muestreo, con mayor proporción de hembras maduras en enero y marzo (2008) y gestantes en noviembre (2007), abril y mayo (2008), se propone que su reproducción está determinada por los periodos hidrobiológicos, con una maduración gonadal de cuatro meses, la copulación en épocas secas y de lluvia, con una fecundidad uterina entre tres y cinco embriones, con periodos de gestación entre cuatro a cinco meses en un mismo hábitat. Charvet-Almeida *et al.* (2005) indican que la reproducción de los potamotrigónidos varía de acuerdo a la especie, donde la maduración gonadal puede estar entre dos y cuatro meses, la copulación en diferentes épocas, la gestación desde tres hasta nueve meses, con nacimientos en época de lluvia, seca o la transición de éstas. Por su parte, Castex (1963), sugiere para estas rayas un periodo reproductivo que presenta estadios definidos; maduración gonadal, copulación, embarazo y nacimiento en un mismo hábitat.

Se registraron 47 embriones procedentes de 24 hembras con tallas entre 175 y 422mm AD; nueve de ellos, se encontraron en desarrollo temprano (estado 1) (30 a 55mm AD), 12 (58 a 65mm AD) poco desarrollados, pero diferenciadas sus principales estructuras (estado 2), 16 (70 a 86mm AD) con alto contenido de saco vitelino (estado 3) y 11 (87 a 95mm AD), con todas sus estructuras bien desarrolladas (estado 4). Los embriones se localizaron en ambos úteros, los cuales, nacen con restos de saco vitelino sin ninguna conexión con la madre; los úteros presentan vellosidades internas en las paredes, siendo más agregadas y notables en estadios maduros (Figura 2b), presentado un modo reproductivo descrito por varios autores (Thorson *et al.* 1983; Teshima & Takeshita, 1992; Charvet-Almeida *et al.* 2005) como vivíparo matrotrofico con desarrollo de trofonemata. La talla de nacimiento, se estimó entre 87-95 mm AD, entre tres y cinco neonatos, lo que difiere con lo encontrado por Teshima & Takeshita (1992), quienes describieron que hembras (210-240mm AD) de *P. magdalenae* desarrollan un simple embrión (42-68mm AD) en cada útero (Figura 2c). El dimorfismo sexual, en cuanto a la anchura del disco en hembras que logran mayor tamaño, podría ser una tentativa de maximizar el espacio requerido para la generación de más embriones (Charvet-Almeida *et al.* 2005), pero en *P. magdalenae*, se observó que la talla materna no determina el número de embriones que estas pueden contener; así, hembras de gran tamaño o pequeñas, pero maduras tienen el mismo número de embriones en los úteros.

Los machos de *P. magdalenae* estuvieron representados por el estadio III, con 49% (n = 134), seguido del estadio I, con 30% (n = 82) y, finalmente, el estadio II, con un 21% (n = 57); su mayor abundancia se observó con la presencia permanente de individuos maduros a lo largo del muestreo, con

mayor proporción en enero (73%) y abril (66%) y en menor representatividad en marzo (27%). Al igual que *P. aiereba* y *P. orbigny* en los llanos de Venezuela, según Lasso *et al.* (1996), los machos de *P. magdalenae* no tienen una época reproductiva definida, ya que estuvieron al parecer activos sexualmente durante todo el tiempo de estudio y la cópula tiene lugar durante todo el año.

Al analizar los datos y la fluctuación de la proporción sexual en el tiempo y se comprobó que no hubo segregación de sexos; la proporción de sexos fue 1:1, coincidiendo con lo hallado por Lasso *et al.* (1996), para *Paratrygon aiereba* 1:1, pero difiere de lo propuesto para *Potamotrygon orbigny* 1:2, en el mismo estudio; luego, Barbarino & Lasso (2005) registraron para *P. aiereba* una proporción de 1:2 machos a hembras, siendo diferente a lo apreciado por Lasso *et al.* (1996) en esta especie; es probable que la proporción pueda variar con respecto al arte usado, ya que Barbarino & Lasso (2005) emplearon arpón, más común para la captura de esta especie en Venezuela y altamente selectivo, ya que busca atrapar especímenes de mayor tamaño, como las hembras. En cuanto al trasmallo y el chinchorro, son artes que no van dirigidos a las rayas, por lo que la captura es incidental, obteniendo especímenes de ambos sexos y de diferentes tallas en similares proporciones.

Las hembras presentaron una talla media de madurez de 240mm AD y los machos de 202mm AD, obtenida a partir de 77 hembras maduras (IIIa, IIIb y IV) y 132 machos maduros (III). La talla mínima de madurez fue de 164 mm AD, en hembras y 160mm AD, en machos (Figura 3). Thorson *et al.* (1983) hallaron en *P. circularis* hembras que ya empiezan su maduración a los 350 hasta 450 mm AD y para *P. motoro* ocurre entre 240 – 320mm AD; los resultados obtenidos de la talla mínima y media de madurez indican que las hembras de *P. magdalenae* empiezan su maduración entre 164 – 240mm AD y los machos entre 160 – 210mm AD.

A diferencia de lo descrito por González & Oyarzún (2002), quienes señalan que el IGS se relaciona en forma inversa al FC y al IHS, debido a una demanda de energía por parte del pez para procesos reproductivos, estos índices en *P. magdalenae* no revelaron cambios a lo largo de los meses. Se observó que no existe una correspondencia entre IGS y FC en hembras ( $r^2 = 0,305$ ;  $p = 0,46$ ), tampoco en machos ( $r^2 = 0,279$ ;  $p = 0,50$ ). Por tanto, en la raya de río no se evidencia un comportamiento que pudiera estar reflejando movimientos de energía somática hacia las gónadas. Lo mismo sucede con la relación entre el IGS e IHS, en hembras y machos ( $r^2 = 0,050$ ;  $p = 0,89$  y  $r^2 = 0,22$ ;  $p = 0,59$ , respectivamente), que tampoco mostró una concordancia, lo que estaría indicando continuo flujo de energía del hígado hacia las

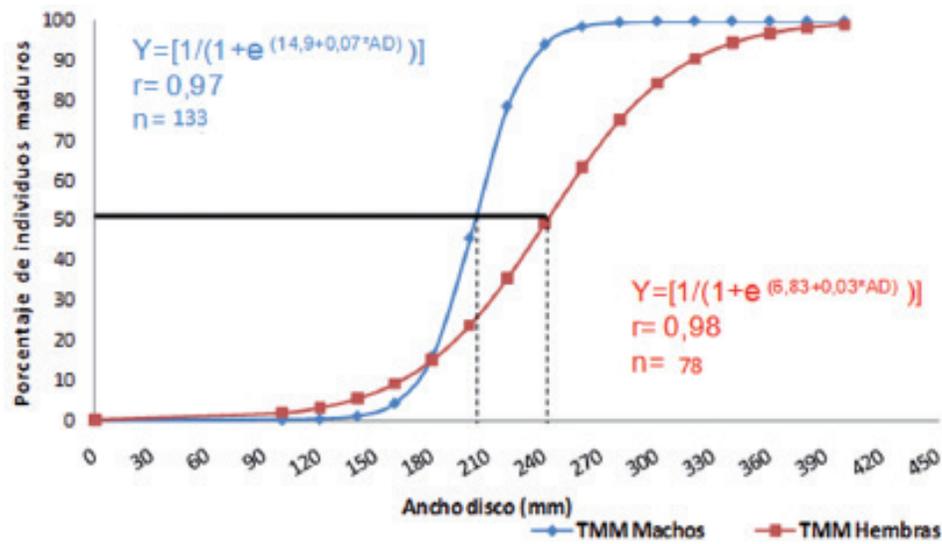


Figura 3. Talla media de madurez para las hembras y para los machos de *Potamotrygon magdalenae*, la curva representa el ajuste de los datos.

gónadas, utilizada para la producción de gametos, sin estar centrado en un período específico. Al aparecer *P. magdalenae* es una especie con un comportamiento de alimentación constante, lo que podría estar indicando, en alguna medida, un aporte constante de energía, que le permitirían soportar la maduración y el desove. Esto también la anotan Teshima & Takeshita (1992), indicando que la especie puede no tener una estación reproductiva definida, presentándose machos y hembras maduras todo el año.

En los ocho meses de muestreo, se analizaron 266 estómagos: 154 procedentes de machos (57,8%) y 112 de hembras (42,1%); 39, (14,6%) estuvieron vacíos y 227, (85,3%) tenían algún tipo de contenido. El grado de llenado estomacal se encontró, principalmente, representado por la escala 1, (1/4 de llenado), con un 30%, seguido de la escala 2, (1/2 de llenado), con un 21,8% de estómagos y, finalmente, las escalas 4 (lleno totalmente), 3 (3/4 de llenado) y 0 (vacío), con porcentajes de llenado similares, 17,3%, 15,4% y 15,4%, respectivamente, indicando, para el último valor, que los especímenes se habían alimentado mucho antes de su captura (Machado *et al.* 2004). En el total de estómagos analizados predominó el grado de digestión 4 (presencia de materia orgánica y restos de esqueleto), con un 30,3%, seguido del grado 1 (individuos que presentan todas las características morfológicas completas que los hacen fácilmente identificable), con un 28,3% y 2 (ejemplares con cabeza y ojos, sin piel y músculos al descubierto), con 21,6%, siendo el estadio 3 (presas sin cabeza, algunas partes del cuerpo presentes y esqueleto axial) el menos frecuente.

Los contenidos estomacales, se agruparon en tres ítems: insectos acuáticos (Ephemeroptera: Polymitarcyidae y sus larvas, seguidos por Diptera: Ceratopogonidae, Chironomidae y sus larvas, Odonata: Aeshnidae y huevos en general), moluscos (opérculos y vísceras de gasterópodos) y detritus (partículas de sedimento y materia orgánica no identificada).

La familia Polymitarcyidae, en general, presentó la mayor frecuencia de ocurrencia de todos los componentes hallados, con un (55,6%), seguido del detritus (30,8%) y, finalmente, aparecieron larvas (35,7%); la menor fue registrada para las vísceras de gasterópodos (1,5%) y la familia Aeshnidae y Chironomidae (2,6%). La frecuencia de aparición de Polymitarcyidae en los contenidos estomacales puede ser explicada por una alta abundancia en la ciénaga del Sabayo, donde se encuentran las condiciones propicias para desarrollarse, como aguas cálidas y fondos arenosos; son un grupo bentónico abundante empleado como indicador de aguas limpias (Roldán, 1988). Por su parte, Ceratopogonidae es una familia común en aguas lénticas, charcas y lagos con material orgánico en descomposición, cuya presencia y abundancia se suele interpretar como indicador de aguas mesoeutróficas (Roldán, 1988); su aparición junto con la familia Aeshnidae, como presa de las rayas se explica, porque suelen estar asociados a las raíces de macrófitas (Roldán, 1988), muy abundantes en el Sabayo.

Resultados similares fueron propuestos por Dahl (1971), quien informa para *P. magdalenae* que su alimento se basa

de gusanos, de moluscos y de otros invertebrados. El espectro trófico descrito es similar al propuesto para *P. orbigny*, el cual, está conformado por 13 categorías de alimento, entre las que se encuentra Coleoptera, Hemiptera, Odonata, Trichoptera, Chironominae, Ceratopogonidae, ostrácodos, plantas e insectos sin identificar (Lasso *et al.* 1996). La composición de los ítems, tanto en hembras como en machos de diferentes tallas, estuvo representada por insectos acuáticos de actividad bentónica en cuerpos de aguas lentas, coincidiendo con lo que citan Galvis *et al.* (1997), quienes argumentan que *P. magdalenae* prefiere los fondos lodosos con aguas turbias y poco profundas, consumiendo estadios larvarios de insectos y de detritus. Con base en los resultados y en lo antes mencionado, se confirma que *P. magdalenae* en la ciénaga de Sabayo es consumidora primaria, insectívora-detrítivora de hábitos bentónicos, como lo propone Villa-Navarro (1999), aunque el presente estudio indicó que la mayor parte de los estómagos analizados contuvieron escaso alimento digerido y que la materia orgánica hallada (detritus), probablemente, está relacionada con la ingestión accidental de estas partículas (Machado *et al.* 2004), al succionar para capturar sus presas, como lo registraron en *P. orbigny* y *P. iwame*, Lasso *et al.* (1996).

Analizando la dieta de la especie en función del microhábitat ocupado, se sugiere que *P. magdalenae* tiene una dieta especializada consumiendo más Polymitarcidae, Ceratopogonidae y larvas de estos, sin encontrar diferencias temporales ni espaciales de estos recursos, a diferencia de lo que proponen Silva & Uieda, (2007) en *P. motoro*, quienes encontraron una dieta especializada sobre Ephemeroptera para esta especie, distinta de *P. falkneri*, para la cual, propusieron una dieta generalizada, conformada por Mollusca, Hemiptera y Trichoptera.

**Agradecimientos:** Este trabajo se realizó con el apoyo logístico y financiero de la Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano (UJTL), Facultad de Ciencias Naturales e Ingeniería, Programa de Biología Marina, Sede Santa Marta. Agradecimientos especiales a los pescadores de la ciénaga del Sabayo y Guaimaral. Contribución 028 del Grupo de Investigación de Peces del Caribe (GIPECA-UJTL). **Conflicto de intereses:** Este manuscrito fue preparado y revisado con la participación de todos los autores, quienes declaramos que no existe ningún conflicto de intereses que ponga en riesgo la validez de los resultados presentados.

## BIBLIOGRAFÍA

1. ARIAS, P. 1993. Artes y métodos de pesca en aguas continentales de Colombia. Subgerencia de operaciones. Primera edición. Instituto Nacional de Pesca y Acuicultura INPA. Bogotá, 39p.
2. ARTEAGA, E.; CRIALES-HERNÁNDEZ, M.I.; RODRÍGUEZ D.J.; GÓMEZ-CANCHONG P.; MANJARRÉS, L. 2004. Dinámica reproductiva de los stocks de pargo rayado *Lutjanus synagris* (Linnaeus, 1758) en el área norte del Caribe colombiano. En: Manjarrés, L. (Ed). 2004. Pesquerías demersales del área norte del Mar Caribe de Colombia y parámetros biológico – pesqueros y poblacionales del recurso pargo. Instituto Nacional de Pesca y Acuicultura INPA – Instituto Colombiano para el Desarrollo de la Ciencia y la Tecnología “Francisco José de Caldas” – COLCIENCIAS. p.203-215.
3. BABEL, J.S. 1967. Reproduction, life history, and ecology of the round stingray *Urolophus halleri* Cooper. Calif. Dep. Fish Game, Fishery Bulletin. p.137, 104.
4. BARBARINO, A.; LASSO, C. 2005. Pesquería y aspectos biológicos de la raya manta *Paratrygon aiereba* (Müller y Henle, 1841) (Myliobatiformes: Potamotrygonidae), en el río Apure, Venezuela. Memoria de la Fundación La Salle de Ciencias Naturales 163:93-108.
5. CALDAS, J.P.; CASTRO-GONZÁLEZ, E.; PUENTES, V.; RUEDA, M.; LASSO, C.; DUARTE, L.O.; GRIJALBA-BENDECK, M.; GÓMEZ, F.; NAVIA, A.; MEJÍA-FALLA, P.; BESSUDO, S.; DIAZGRANADOS, M.C.; ZAPATA, L. (Eds.). 2010. Plan de Acción Nacional para la Conservación y Manejo de Tiburones, Rayas y Quimeras de Colombia (PAN-Tiburones Colombia). Instituto Colombiano Agropecuario, Secretaría Agricultura y Pesca San Andrés Isla, Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras, Instituto Alexander von Humboldt, Universidad del Magdalena, Universidad Jorge Tadeo Lozano, Pontificia Universidad Javeriana, Fundación SQUALUS, Fundación Malpelo y otros Ecosistemas Marinos, Conservación Internacional, WWF Colombia. Editorial Produmedios, Bogotá. 60p.
6. CASTEX, M. 1963. Observaciones sobre la raya de río *Potamotrygon motoro* (Müller y Henle). Ministerio de Educación y Justicia de la Nación. Dirección General de Cultura. Hidrobiología. Tomo I. Buenos Aires, 2; 17p.
7. CHARVET-ALMEIDA, P.; GOES, M.; PINTO, M. 2005. Reproductive aspects of freshwater stingrays (Chondrichthyes: Potamotrygonidae) in the Brazilian Amazon Basin. J. Northwest Atlantic Fishery Science. Brasil, 35:165-171.

8. DAHL, G. 1971. Los peces del Norte de Colombia. Ministerio de Agricultura. Instituto de desarrollo de los recursos naturales renovables INDERENA, Bogotá, 391p.
9. GALVÁN, F.; NIENHUIS, H.; KLIMLEY, P. 1989. Seasonal abundance and feeding habits of shark of the lower gulf of California, Mexico. California Fish and Game. 75:74-84.
10. GALVIS, G.; MOJICA, J.; CAMARGO, M. 1997. Peces del Catatumbo. Asociación Cravo Norte (ECOPETROL, OXY, Shell). 1ª ed. Bogotá, p.24-25.
11. GONZÁLEZ, P.; OYARZÚN, C. 2002. Variabilidad en índices biológicos en *Pinguipes chilensis* (Perciformes, Pinguipedidae): ¿Están realmente correlacionados? Gayana. 66(2):249-254.
12. GRIJALBA-BENDECK, M.; ACERO, A.; GONZÁLEZ, E. 2008. Biología reproductiva de *Rhinobatos percellens* (Walbaum, 1792) (Batoidea: Rajiformes) en el Caribe colombiano. Rev. Biología Marina y Oceanografía. 43(3):469-481.
13. GUTIÉRREZ, J.; BENÍTEZ-GUERRA, I.; BENÍTEZ-GUERRA, G. 2004. Envenenamiento por rayas de agua dulce. Rev. Facultad de Medicina. 27(2):131-134.
14. HYSLOP, E. 1980. Stomach contents analysis: A review of methods and their application. J. Fish Biology. 17:411-429.
15. IUCN. 2011. IUCN Red List of Threatened Species. Version 2011.1. Disponible desde Internet en: [www.iucnredlist.org](http://www.iucnredlist.org) (con acceso 03/08/11).
16. LASSO, C.; RIAL, A.; LASSO-ALCALÁ, O. 1996. Notes on the biology of the freshwater stingrays *Paratrygon aiereba* (Müller y Henle, 1841) and *Potamotrygon orbignyi* (Castelnau, 1855) (Chondrichthyes: Potamotrygonidae) in the Venezuelan Llanos. Aqua, J. Ichthyology and Aquatic Biology. 2(3):39-50.
17. MACHADO, A.; CHARVET-ALMEIDA, P.; BORGES, R. 2004. Preliminary observations on the feeding of the freshwater stingrays *Potamotrygon orbignyi*, *Potamotrygon scobina* and *Plesiopygion iwamae* (Chondrichthyes: Potamotrygonidae) in the Cotijuba Island region - Pará - Brazil. EN: Biology and Conservation of Freshwater Elasmobranchs. Symposium Proceedings. International Congress on the Biology of Fish. p.41-51.
18. NELSON, J. 2006. Fishes of the world. Forth Edition. Department of Biological Science, University of Alberta. John Wiley and Sons, Inc. Canada. 601p.
19. POLO-SILVA, C.; BAIGORRÍ-SANTACRUZ, A.; GALVÁN-MAGAÑA, F.; GRIJALBA-BENDECK, M.; SANJUAN-MUÑOZ, A. 2007. Hábitos alimentarios del tiburón zorro *Alopias superciliosus* (Lowe, 1839), en el Pacífico ecuatoriano. Rev. Biol. Marina y Oceanogr. 42(1):59-69.
20. PUENTES, V.; NAVIA, A.; MEJÍA-FALLA, P.; CALDAS, J.; DÍAZGRANADOS, M.; PADILLA, L. 2009. Avances en el conocimiento de tiburones, rayas y quimeras de Colombia. Fundación SQUALUS, Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial, Instituto Colombiano Agropecuario, COLCIENCIAS, Conservación Internacional, WWF Colombia. p.195-245.
21. RAMÍREZ-GIL, H.; CARRILLO-VILLAMAR, L.; LACER-PADILLA, E.; AJIACO-MARTÍNEZ, R. 2001. La pesca de especies de interés ornamental en el área de influencia de Puerto Carreño. En: Ramírez, H.; Ajiaco, R. eds. La pesca en la baja Orinoquia colombiana: una visión integral. 1ª ed. Instituto Nacional de Pesca y Acuicultura. p.123-137.
22. ROLDÁN, G. 1988. Guía para el estudio de los macroinvertebrados acuáticos del Departamento de Antioquia. Fondo FEN Colciencias, Colciencias, Universidad de Antioquia. 217p.
23. SILVA, T.; UIEDA, V. 2007. Preliminary data on the feeding habits of the freshwater stingrays *Potamotrygon falkneri* and *Potamotrygon motoro* (Potamotrygonidae) from the Upper Paraná River basin, Brazil. Biota Neotropica 7(1):221-226.
24. TESHIMA, K.; TAKESHITA, K. 1992. Reproduction of the freshwater stingray *Potamotrygon magdalenae* taken from the Magdalena river system in Colombia, South America. Bull. Seikai Nal Fisheries Res. Inst.. 70:11-27.
25. THORSON, T.; LANGHAMMER, J.; OETINGER, M. 1983. Reproduction and development of the South America freshwater stingrays, *Potamotrygon circularis* and *P. motoro*. Environ. Biol. Fishes. 9(1):3-24.
26. TRESIERRA, A.; CULQUICHICÓN, Z. 1993. Biología pesquera. Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, Perú. 432p.

- 
27. VILLA-NAVARRO, F. 1999. Estudio biológico-pesquero de la represa de Prado, para la determinación de las especies promisorias para acuicultura. (Universidad del Tolima, Cortolima. Colombia. 105p.
28. VILLALOBOS, U. 2006. Génesis de Guaimaral. Editorial Imaginaria. Colombia. p.28-30.
29. YÉPEZ, A.; ESPINOSA, V. 1970. Observaciones en el peso y ancho del disco de la raya pintada *Potamotrygon magdalenae* (Duméril). Acta Científica. 8(2):7-10.
- Recibido: Febrero 18 de 2011  
Aceptado: Septiembre 12 de 2011

# EVOLUCIÓN DE INTERACCIONES PARÁSITO – HOSPEDERO: COEVOLUCIÓN, SELECCIÓN SEXUAL Y OTRAS TEORÍAS PROPUESTAS

## THE EVOLUTION OF HOST-PARASITE INTERACTIONS: COEVOLUTION, SEXUAL SELECTION AND OTHER SUGGESTED THEORIES

Guillermo Rico-Hernández<sup>1</sup>

<sup>1</sup> MV, M.Sc., Consultor, Instituto de Investigación de Recursos Biológicos “Alexander von Humboldt”, Bogotá, D.C., Colombia. gricoh@hotmail.com

Rev. U.D.C.A Act. & Div. Cient. 14(2): 119 - 130, 2011

### RESUMEN

Esta revisión resume los modelos teóricos de interacciones parásito-hospedero que se encuentran disponibles en la literatura científica. Se revisaron publicaciones internacionales en revistas especializadas sobre parasitología y ecología. Estudios teóricos y prácticos de las interacciones parásito-hospedero, en algunos casos, sugieren variaciones evolutivas y ecológicas. La evolución de las interacciones parásito-hospedero no se limita a consideraciones coevolutivas, sino que tiene efectos directos sobre caracteres de historia de vida del hospedero, evolución del sexo, comportamiento reproductivo, selección sexual e, incluso, sobre transferencia génica. El estudio de las interacciones parásito-hospedero, como fuerzas modeladoras de la evolución y ecología de los organismos, tiene gran importancia, pues aunque, actualmente, carece de evidencia firme en la práctica en algunas de sus áreas y permanece como difícil de demostrar, es clara de manera teórica.

Palabras clave: Parasitismo, modelos teóricos, selección sexual, teoría evolutiva

### SUMMARY

This review summarizes the theoretical models of the parasite-host interactions, available in literature. Articles published in international journal specialized in parasitology and ecology were revised. Some theoretical and experimental studies on host-parasite interactions suggest evolutive and ecologic variations. The evolution of host-parasite interactions is

not constrained to coevolutive considerations, it has direct effects on host life-history traits, sex evolution, reproductive behavior, sexual selection and even on gene exchange. Even though there is scarcity of evidence in the practice, the study of host-parasite interactions as modelling forces of the evolution and ecology of organisms is a milestone, it is clear in theory.

Key words: Parasitism, theoretical models, sexual selection, evolutive theory

### INTRODUCCIÓN

En la literatura científica es frecuente la publicación de artículos y de libros sobre parasitismo asociados, principalmente, a su manejo farmacológico y a la fisiopatología de los mismos; pero es escasa la generación de conocimiento en aspectos ecológicos y evolutivos del parasitismo. Este tipo de investigaciones, así sea desde ámbitos teóricos, pueden aportar significativamente al conocimiento del papel que ejercen los parásitos sobre los seres vivos.

Se incluye, dentro de este artículo de revisión, evidencias que soportan y controvierten las diferentes teorías que han surgido para explicar las diversas interacciones ecológicas y evolutivas entre parásito y hospedero.

El parasitismo es una forma de interacción ecológica, en la cual, un miembro, el parásito, se beneficia por el uso de recursos reunidos por otro miembro, el hospedero. A través de su historia evolutiva, las especies han convivido con

poblaciones de parásitos que han regulado, junto con otras interacciones ecológicas, tanto sus tamaños y sus estructuras poblacionales como su estructura genética (O'Brien & Evermann, 1988; Dobson & Hudson, 1992; Barlow, 1996). Los parásitos tienen una influencia sobre los hospederos, similar a la que cumplen los depredadores, los competidores y otros enemigos naturales (Lyles & Dobson, 1993; Boots & Sasaki, 2001). De hecho, la influencia de un parásito en un hospedero puede afectar su respuesta a competidores y mutualistas, su reacción a las condiciones físicas del medio ambiente, su estado de salud, su capacidad reproductiva, su habilidad para obtener recursos o su conservación (Begon *et al.* 1986; Proctor & Owens, 2000; Cunningham *et al.* 2003; Daszak *et al.* 2003; Rico-Hernández, 2004; Rico-Hernández *et al.* 2004; Stoner *et al.* 2005; Santos-Angonesi *et al.* 2009; Valdespino *et al.* 2010). Es así como la esencia del parasitismo descansa en la interacción parásito-hospedero (IPH).

Una de las áreas de interés en la biología evolutiva es el estudio del proceso mediante el cual, las interacciones inter-específicas han influido en las tasas de evolución y los patrones de radiación adaptativa de los organismos involucrados. Éste es uno de los aspectos más complejos, pues requiere, en gran manera, la síntesis de dos teorías incompletas: la teoría genética de la evolución y la teoría ecológica de estructura de comunidades (Futuyma, 1986). Existen muchos tipos de asociaciones en los que hay interacciones de evolución recíproca entre los miembros de la asociación (por ejemplo, predador-presa, planta-patógeno, planta-polinizador, parásito-hospedero, entre otros). Esta interacción de evolución recíproca se conoce como coevolución (Carius *et al.* 2001).

## MATERIALES Y MÉTODOS

Se realizó una revisión retrospectiva de literatura publicada en revistas y en libros especializados en parasitología y en ecología, desde los años 80 hasta la fecha, época en la que se inició el desarrollo de los conceptos teóricos de coevolución. Esta revisión permitió, a su vez, evaluar la evolución teórica sobre la interacción parásito-hospedero.

## TEORÍAS SOBRE IPH

Modelos de coevolución parásito-hospedero: El término coevolución ha sido definido de diversas maneras. Por ejemplo, se ha entendido por coevolución el cambio en la estructura genética de cada una de las especies interactuantes en respuesta al cambio genético de la otra especie. Anderson (1991), por su parte, considera que la naturaleza básica del modelo de vida de un parásito supone que los parásitos y los

hospederos coevolucionan de una forma dinámica. En años más recientes, Thompson (1994) aporta mayor claridad al concepto, definiéndolo como el cambio evolutivo recíproco en especies interactuantes.

Tradicionalmente, ha existido el consenso de que parásitos *bien adaptados* afectan poco a sus hospederos (O'Brien & Evermann, 1988; Lively & Apianus, 1998), pero, actualmente, esta idea ha sido cuestionada en la medida en que estudios teóricos han indicado que muchas rutas coevolutivas se deben seguir en respuesta a las interacciones entre la patogenicidad del parásito y la eficiencia de la transmisión del patógeno al hospedero (Gulland, 1998).

Uno de los modelos de coevolución parásito-hospedero es el de coespeciación alopátrica, el cual, se basa en el supuesto que parásitos y hospederos simplemente comparten espacio y energía. De manera tal que, cuando el flujo génico en una población de hospederos es interrumpido por un evento de vicarianza (formando dos subpoblaciones), también es interrumpido el flujo génico en los parásitos, dando como resultado especiación alopátrica, tanto de la población de hospederos como en la de parásitos (Bush *et al.* 2001). El tiempo de la especiación para parásito y hospedero no es necesariamente el mismo y la coespeciación puede ser sincrónica o retardada (Hafner & Nadler, 1990). En la especiación sincrónica, el hospedero y el parásito se especian simultáneamente y sus linajes muestran grados similares de divergencia evolutiva. En contraste, en la coespeciación retardada uno de los miembros de la asociación se retrasa del otro. De tal forma que si la especiación del parásito se retrasa de la del hospedero, la divergencia evolutiva del primero será menor que la del hospedero.

El modelo de rastreo de recursos, se basa en el concepto ecológico de que los hospederos son parches de recursos necesarios que los parásitos rastrean a través del tiempo evolutivo (Bush *et al.* 2001). Bajo este escenario, los parásitos evolucionan en respuesta al cambio en el recurso ofrecido por el hospedero y, en consecuencia, si un hospedero cambia el recurso buscado por el parásito, es probable que éste sufra un cambio evolutivo que le permita explotar el nuevo recurso.

Un tercer modelo, llamado *Carrera Armamentista Evolutiva* (CAE), representa un punto de vista coevolutivo más estricto, pues requiere de la respuesta adaptativa mutua entre parásito y hospedero (Carius *et al.* 2001). El modelo asume que parásito y hospedero evolucionan constantemente de una manera agresiva el uno hacia el otro. La selección del parásito va dirigida siempre hacia una mayor explotación del hospedero, mientras que la selección en este último es siempre hacia una exclusión más efectiva del parásito. Se

asume que las CAE ocurren en el contexto de la hipótesis gen-por-gen, que propone que por cada gen causante de la resistencia en un hospedero, hay un gen correspondiente por virulencia en el parásito. La resistencia en el hospedero y la virulencia en el parásito son los genes dominantes; de la misma forma que la susceptibilidad en el hospedero y la avirulencia en el parásito constituyen los genes recesivos (Tabla 1).

La posible secuencia de eventos para el desarrollo de una CAE requeriría de los siguientes pasos: primero, el parásito reduce la adecuación del hospedero y éste adquiere mecanismos de defensa contra el parásito, a través de mutación o de recombinación. El hospedero con este nuevo mecanismo de defensa ha aumentado su adecuación y el carácter se dispersa dentro de la población (probablemente,

Tabla 1. Resistencia y susceptibilidad esperada de un hospedero a varios genotipos de parásito en el contexto de la hipótesis gen-por-gen (Tomado de Bush *et al.* 2001).

Genotipo del Parásito*	Genotipo del Hospedero**		
	RR	Rr	Rr
AA	Hospedero resistente	Hospedero resistente	Hospedero susceptible
Aa	Hospedero resistente	Hospedero resistente	Hospedero susceptible
Aa	Hospedero susceptible	Hospedero susceptible	Hospedero susceptible

\*A, gen dominante del parásito que confiere virulencia; a, gen recesivo del parásito que confiere avirulencia.

\*\*R, gen dominante del hospedero que confiere resistencia al parásito; r, gen recesivo del hospedero que confiere susceptibilidad.

una nueva especie de hospedero). Eventualmente, una nueva mutación o recombinación aparece en la población del parásito y lo hace capaz de superar la nueva defensa. Si esta contra-defensa aumenta, la adecuación del parásito, se esparcirá en la población (probablemente, una nueva especie de parásito) y será capaz de parasitar al grupo antes protegido. Bajo este orden de ideas, el ciclo se repetirá de nuevo (Bush *et al.* 2001).

No obstante, lo anterior supone una debilidad a la teoría de coevolución parásito-hospedero y es que la mayoría de los modelos de evolución de parásitos presumen que la población hospedera es homogénea en sus características de resistencia; sin embargo, se ha demostrado que algunos hospederos pueden diferir en su habilidad para resistir al efecto del parásito (Gandon & van Zant, 1998; Gandon *et al.* 2002).

Por otro lado, se ha advertido que dos procesos distintos, coacomodación, proceso de reconciliación entre el parásito y el hospedero, que permite la coexistencia, y coespeciación, que ocurre en conjunto, debido a la especiación del hospedero o independientemente, estableciéndose tanto en diferentes especies de hospedero o en sitios diferentes o en el mismo hospedero, habían sido frecuentemente tomados erróneamente como coevolución y, por el contrario, deberían ser diferenciados entre sí (Stuart & Strier, 1995).

El resultado de las interacciones parásito-hospedero (IPH): Hasta la década de los 60, el paradigma para los parasitólogos era que en el tiempo evolutivo, las IPH evolucionaran casi invariablemente hacia el comensalismo (Gandon *et al.* 2002). En este contexto, las IPH actuales en las que el parásito es altamente patógeno eran vistas como relativamente nuevas en el tiempo evolutivo o, incluso, ecológico. Esta perspectiva implica que las relaciones antagonistas parásito-hospedero están o en camino de extinguir a uno o ambos participantes o evolucionando a una interacción más suave. Desde entonces, la síntesis gradual de estudios ecológicos, evolutivos y de genética de poblaciones han cambiado esta perspectiva y este paradigma ha sido reemplazado por la perspectiva de que todos los resultados son posibles, del comensalismo a un gran antagonismo (Thompson, 1994).

El paradigma clásico de la IPH evolucionando, exclusivamente a un resultado benigno, se basa en el supuesto que un parásito que causa poco daño representa una ventaja, tanto al hospedero como al parásito. La mayoría de la evidencia que apoya este concepto proviene de observaciones de parásitos menos patógenos en su hospedero regular que en hospederos nuevos, introducidos en su rango de distribución y parásitos recién evolucionados, altamente patógenos, se vuelven gradualmente más benignos (Bush *et al.* 2001; Cunningham *et al.* 2003). Por ejemplo, en el Este de África los rumiantes nativos sufren infecciones suaves con morbilidad insignificante, debido al hemoflagelado *Trypanosoma*

*brucei*; en contraste, los rumiantes domésticos introducidos que han sido criados en el área por largo tiempo desarrollan síntomas más serios y los animales recién importados sufren de infecciones típicamente fatales (Allison, 1982).

Sin embargo, los parásitos introducidos (o asociaciones parásito-hospedero nuevas) no siempre son más dañinas que los parásitos adaptados. Existe evidencia del caso opuesto: los parásitos nuevos parecen menos dañinos, menos infecciosos y menos adecuados que los mismos parásitos que infectan al hospedero, al cual, están adaptados. La explicación de la alta patogenicidad observada en asociaciones nuevas puede ser sencilla. Es probable que estos casos sean excepciones que han sido notadas, debido a sus efectos extremos, mientras que otras numerosas asociaciones nuevas han pasado inadvertidas por su benignidad. Es también probable que lo que se observa como una alta virulencia en la introducción de algunos parásitos sea simplemente una respuesta ecológica a una interacción ecológica nueva de dos poblaciones no ajustadas y no una respuesta evolutiva de la interacción (Bush *et al.* 2001).

Los puntos de vista actuales indican que el resultado de las IPH representa un continuo, desde el antagonismo hasta el mutualismo, dependiendo de la historia natural de los organismos involucrados, con énfasis en la forma de transmisión y reproducción (Gandon *et al.* 2002).

Algunas de las ideas prevalecientes afirman que los distintos niveles de reproducción y de patogenicidad del parásito dependen del grado al que los costos y beneficios de la reproducción extensiva varían entre diferentes especies de parásitos. Por ejemplo, debido a que los hospederos son islas temporales para los parásitos, la transmisión efectiva de un hospedero a otro es esencial para la supervivencia de su material genético.

De igual forma, la reproducción extensiva de un parásito dentro de un hospedero aumentará el número de parásitos disponibles para infectar a otros hospederos. Si esto ocurre, la reproducción de los hospederos se puede ver afectada de manera adversa y su inmovilización o muerte reducirán la probabilidad del parásito de infectar a otros.

Por otro lado, si los parásitos son transmitidos por vectores, la inmovilización del hospedero aumentará su probabilidad de ser picado y una reproducción extensiva por parte del parásito resultará benéfica, pues aumentará la probabilidad de infectar al vector. En resumen, la reducción de la movilidad de los hospederos debe ser costosa para los parásitos que dependen de ella para su transmisión; estos parásitos, entonces, deben tener una menor virulencia; no obstante, si la movilidad del hospedero no afecta la transmisión del

parásito, la adecuación de este último no se verá afectada por la falta de movilidad del primero y la selección natural favorecerá un alto nivel de explotación del hospedero y aumentará la virulencia (Ewald, 1995).

A partir de información sobre tasas de mortalidad de enfermedades humanas como estimador de la patogenicidad, Ewald (1995) demostró que las enfermedades transmitidas por insectos eran significativamente más letales que las transmitidas sin vectores intermedios. De manera similar, usando la inmovilización del hospedero como indicador de patogenicidad, concluyó que las enfermedades transmitidas por vectores fueron significativamente más letales.

No todos los parásitos que dependen de vectores para su transmisión muestran el mismo patrón. La variabilidad relacionada con la historia natural de las IPH puede cambiar significativamente el resultado de la interacción. Mock & Gill (1984) estudiaron la dinámica de la relación entre el tritón de manchas rojas *Notophtalmus viridescens* y el tripanosoma *Trypanosoma diemyctyli*. El estudio indicó que el parásito no aumentaba la mortalidad ni la habilidad reproductiva del hospedero. Las sanguijuelas acuáticas son los vectores para este hemoparásito, lo que ocasiona que sólo cuando son juveniles y tienen ciclos de vida semiacuáticos pueden ser infectados los individuos de la especie. Parece ser que el intervalo de tiempo potencial entre eventos de transmisión (los años pasados fuera del agua como adultos) introdujo una fuerte presión de selección contra los tripanosomas patogénicos. Los tritones parasitados con tripanosomas patogénicos, probablemente, murieron antes de regresar al agua a reproducirse y pasar la infección. Sólo los tritones con hemoparásitos menos patógenos sobrevivieron lo suficiente para regresar al agua.

#### Variación en los caracteres de historia de vida por parasitismo:

La evolución de las IPH no se restringe a consideraciones coevolutivas. Fuera de los límites de la asociación histórica o estricta filogenia, existe un amplio arreglo de interacciones que merecen atención de la perspectiva evolutiva.

Precisamente, los efectos directos de los enemigos naturales (parásitos, patógenos, herbívoros) en los caracteres de historia de vida (crecimiento y reproducción) de sus hospederos están bien documentados: si caracteres particulares de la historia de vida del hospedero resultan en genotipos más susceptibles o más resistentes al parasitismo, estos enemigos naturales pueden afectar la evolución de la historia de vida de los hospederos. Primero, la historia de vida en sí puede ser la base de la resistencia o tolerancia del hospedero y, segundo, los caracteres de historia de vida pueden estar genéticamente correlacionados con caracteres relacionados a la resistencia (Koskela, 2002).

Como ejemplo de caracteres de historia de vida que confieren resistencia, las flores de vida corta de *Silene* sp. tienen menor riesgo de infección por el hongo *Microbotryum violaceum* que las flores de vida más larga, por lo tanto, se espera selección por los tiempos de vida florales cortos cuando el riesgo de infección es alto (Shykoff *et al.* 1996). Una correlación entre la resistencia y la historia de vida del hospedero se ha encontrado en un experimento de selección con el mosquito *Aedes aegypti* donde la resistencia contra la infección de malaria se correlacionó negativamente con el tiempo de desarrollo y el tamaño del adulto (Yan *et al.* 1997). Por otra parte, en un estudio con plantas originarias de ocho poblaciones de *Urtica dioica*, cuatro parasitadas y cuatro no parasitadas por la planta holoparasítica *Cuscuta europeae* se observó que las primeras florecieron posteriormente y asignaron menos biomasa a la reproducción asexual comparadas con las segundas. Estos resultados indican que la selección por el parásito puede haber favorecido el florecimiento tardío y puede haber selección en contra de la reproducción asexual (Koskela, 2002). El estudio realizado en los grillos de la especie *Acheta domesticus* demuestran también un aumento en la postura de huevos, debido a la infección fatal de la bacteria *Serratia marcescens*, lo que apoya la hipótesis que los animales infectados pueden aumentar su productividad reproductiva para compensar su probable pérdida en el futuro, por la enfermedad (Adamo, 1999).

Parásitos y la evolución del sexo: Desde un punto de vista evolutivo, el sexo es una mala idea. Es un proceso costoso en términos de energía y los organismos que se reproducen sexualmente son la mitad de exitosos propagando sus genes que los que no lo hacen. Entonces, ¿por qué existe la reproducción sexual? Una ventaja es la recombinación genética, que aumenta la diversidad génica y asegura la variabilidad, además de purgar mutaciones deletéreas.

Diversas hipótesis han sido propuestas, pero la mayoría caen en una de dos clases. Algunas hipótesis atribuyen el mantenimiento del sexo a la heterogeneidad ambiental en el tiempo o en el espacio. En estos casos, la variabilidad asegurará que al menos algunos genotipos sean exitosos en ambientes variables. Las otras, se atribuyen a las IPH.

Dos hipótesis han sido propuestas sobre los efectos de los parásitos en los caracteres de historia de vida de sus hospederos. Primero, la reproducción sexual será favorecida sobre la asexual cuando el riesgo de infección es alto, dado que la progenie producida sexualmente debe ser más apta para evadir los parásitos que coevolucionan. De acuerdo a la Hipótesis de la Reina Roja (HRR), los parásitos pueden ejercer una fuerte selección sexual dependiente de la frecuencia de encuentros sexuales y los procesos de selección sexual que

favorecen genotipos raros (esta hipótesis sería, en realidad, una CAE más específica) (Lythgoe, 2000). En síntesis, la HRR predice cambio evolutivo continuo (de hospedero y de parásito), bajo condiciones constantes en el ambiente físico. El nombre de la hipótesis proviene del libro de Lewis Carroll *A través del espejo*, que dice que se debe seguir corriendo para simplemente permanecer en el mismo lugar (Martens & Schön, 2000).

La segunda hipótesis predice que un alto riesgo de infección favorecerá la reproducción temprana, especialmente, si la infección tiene efectos dañinos fuertes en la viabilidad del hospedero (por ejemplo, resulta en castración o en muerte del hospedero) o si la preferencia de la infección aumenta con la edad. Los estudios comparativos entre poblaciones han aportado evidencias para ambas hipótesis (Scott, 1988).

Si el sexo es una adaptación contra parásitos debe ser común donde los parásitos son usuales. En Nueva Zelanda, por ejemplo, las poblaciones del caracol dioico de agua dulce *Potamopyrgus antipodarum* están formadas por individuos sexuales y partenogenéticos; Lively (1992) encontró una correlación positiva entre la frecuencia de reproducción sexual en individuos partenogenéticos y el grado de infección por platelmintos de la clase digenea. En poblaciones donde los parásitos son raros, las hembras partenogenéticas habían reemplazado numéricamente a las sexuales, mientras que en poblaciones donde los parásitos eran comunes las hembras sexuales persistían. En otro estudio, se llegó a conclusiones similares, mientras se investigaba el parasitismo en formas sexuales e híbridos partenogenéticos coexistentes de *Poecilopsis monarca*, en México (Lively *et al.* 1990). Los clones partenogenéticos acumulaban parásitos a una mayor tasa que la forma sexual. Si las poblaciones sexuales eran llevadas a endogamia, los efectos antiparasíticos de la reproducción sexual desaparecían, debido a la baja diversidad. Por otro lado, si otros individuos del huésped entraban en la población, el parasitismo declinaba, por un aumento en la diversidad génica. Cabe mencionar que el hecho que los individuos partenogenéticos fueran híbridos puede haber afectado la susceptibilidad a parásitos.

Aunque estos ejemplos proveen evidencia de la presentación de menor parasitismo en poblaciones de reproducción sexual que en aquellas partenogenéticas, no existía evidencia clara para la predicción de selección dependiente de frecuencia, en la que los genotipos raros son seleccionados a favor y los comunes en contra. Dybdahl & Lively (1998), estudiando por un periodo de cinco años linajes clonales del caracol *Potamopyrgus antipodarum* y sus parásitos digeneanos, identificaron marcadores genéticos específicos a cada clon. Con ellos, identificaron clones raros y comunes y siguieron sus frecuencias de presentación y las de sus parásitos, a través

del tiempo. En el periodo del estudio, los clones mostraron la oscilación característica de la selección dependiente de frecuencia de presentación, con ciclaje de clones hospederos y respuestas correlacionadas retardadas en el tiempo por los parásitos. Por ejemplo, uno de los clones comunes infectados fue disminuido en la población y reemplazado por lo que, originalmente, era un clon raro, que también sufrió el mismo proceso posteriormente. Estos clones fueron experimentalmente expuestos al parásito común. En el laboratorio, los clones hospederos que habían sido raros durante los cinco años previos fueron significativamente menos infectados que los clones comunes. Este estudio prueba que los genotipos raros tienen mayor probabilidad de escapar a la infección y que las IPH pueden producir oscilaciones dependientes de la frecuencia de presentación en la población de hospederos.

En otro estudio, Agrawal & Lively (2001) mostraron los efectos de los parásitos en la evolución de la autofertilización evaluando los efectos de la coevolución parásito-hospedero sobre la dispersión de alelos para autofertilización del hospedero, usando modelos de simulación. Se consideraron cuatro modelos genéticos diferentes y se variaron el nivel de pérdida de gametos masculinos, la virulencia de la infección y el grado de autofertilización del parásito. Se halló que los altos niveles de virulencia de los parásitos favorecían la endogamia; aunque ésta interactuaba fuertemente con la pérdida de gametos masculinos, con la base genética de la infección y con el grado de autofertilización del parásito. En resumen, los parásitos pueden ser una fuerza efectiva al detener la dispersión de los alelos de autofertilización, pero los resultados dependen fuertemente de las características del sistema.

Un estudio con poblaciones del gasterópodo de agua dulce *Campeloma limun* (Johnson, 2000) presenta resultados consistentes con dos de las predicciones de la HRR: los individuos partenogénicos persisten en la ausencia de parásitos, pero son sobreexplotados cuando los presentan. En este estudio realizado sobre poblaciones partenogénicas y sexuales, se observó que los individuos sexuales muestran niveles intermedios de parasitismo y que la reproducción sexual puede proveer un escape temporal de los parásitos. Debido a que el hospedero y el tremátodo que lo parasita indican tiempos generacionales similares, la reproducción sexual puede prevenir el rastreo y la sobreexplotación de los genotipos más comunes de hospedero.

De igual forma, la HRR, como explicación para la prevalencia de la reproducción sexual, también ha sido motivo de diversas críticas en los últimos años. Esto es a que, idealmente, cualquier tipo de coevolución, incluida la HRR, requiere de pares únicos de especies interactuantes y el

proceso se diluye cuando especies adicionales se involucran (Thompson, 1994).

West *et al.* (1999) argumentaron que es muy probable que se requiera más de un mecanismo para explicar la prevalencia del sexo. Sugirieron un punto de vista pluralista, combinando la coevolución de la HRR con hipótesis basadas en mutaciones, lo que representará ventajas sobre las hipótesis propuestas en contra. Ampliar el concepto de la HRR a todas las interacciones bióticas, incluyendo predadores y competidores, reforzará la hipótesis de prevalencia de reproducción sexual.

Parasitismo y poliandria: En muchas especies animales, por ejemplo, en insectos (Scarpassa *et al.* 1992) y en aves (Owens, 2002), las hembras se aparean típicamente con más de un macho (poliandria). Diversas hipótesis sugieren las ventajas de este comportamiento reproductivo para las hembras. Una de éstas, conocida como la hipótesis de variabilidad genética contra parásitos, afirma que la poliandria es un mecanismo de defensa contra parásitos, debido a que los múltiples apareamientos aumentan la variabilidad genética (Sherman *et al.* 1988; Baer & Schmid-Hempel, 1999). Dada una selección dependiente de frecuencias negativas de parásitos hacia sus hospederos, la poliandria podría inducir una ventaja selectiva al producir descendencia con genotipos raros. Esta hipótesis ha sido apoyada por varios estudios, por ejemplo, en condiciones de campo, se observó que la variabilidad genética en colonias de *Bombus terrestris* reduce el parasitismo al compararlo con colonias originadas de hembras monándricas (Baer & Schmid-Hempel, 2001). Esta relación entre adecuación y heterogeneidad genética implica consecuencias importantes para la evolución y el mantenimiento de la poliandria. Este estudio aporta también evidencia para la HRR.

Parásitos y selección sexual: Hamilton & Zuk (1982) llamaron la atención sobre el papel potencial de los parásitos en la selección sexual. Propusieron que los caracteres sexuales secundarios, como los colores brillantes y los despliegues de cortejo de muchas especies animales, permiten a las hembras evaluar en su potencial pareja reproductiva la habilidad para resistir parásitos. Al aparearse con estos machos, las hembras asegurarían pasar los genes de la resistencia a su descendencia. Esta hipótesis se basa en tres supuestos: 1) el despliegue de los caracteres sexuales secundarios de un individuo se relaciona con su salud y vigor general; 2) los hospederos evolucionan con los parásitos y como resultado constantemente generan resistencia heredable y, 3) los parásitos tienen un efecto negativo en la viabilidad de los hospederos. La evidencia disponible parece apoyar los supuestos anteriores.

Existen tres modelos básicos de selección sexual mediada por parásitos que puede resultar en cambios adaptativos en la elección de pareja. 1) los individuos pueden evitar aparearse con individuos infectados con parásitos transmitidos por contacto (piojos y parásitos causantes de enfermedades de transmisión sexual), que pueden ser transmitidas a la descendencia; 2) en especies, en las cuales, el macho proporciona cuidado parental, las hembras deben escoger compañeros saludables y vigorosos para ayudar al cuidado de la descendencia y, 3) si la resistencia a los parásitos es heredable, las hembras, se deberán aparear con machos resistentes para obtener genes resistentes para su descendencia. Este último modelo, donde existe resistencia basada en la genética, es un ejemplo del modelo *buenos genes* de selección sexual, pues la elección de la hembra lleva a descendencia más variable con adecuación aumentada (Bush *et al.* 2001).

La hipótesis de Hamilton & Zuk (1982) para la evolución de los caracteres sexuales secundarios, cuando permiten a las hembras evaluar la habilidad del compañero potencial a resistir parásitos, sugiere que en especies, particularmente vulnerables al parasitismo, la selección sexual deberá favorecer un mayor desarrollo de los caracteres *certificado de salud*, permitiendo a las hembras una evaluación más precisa de la carga parasitaria del macho (Kelly *et al.* 2001).

Hamilton & Zuk (1982), originalmente, apoyaron sus hipótesis con observaciones de una asociación positiva entre la prevalencia de hemoparásitos (*Leucocytozoon* sp., *Haemoproteus* sp., *Plasmodium* sp., *Trypanosoma* sp., *Toxoplasma* sp. y microfilarias) y tres tipos de despliegue de los hospederos (brillantez masculina y femenina y complejidad de la vocalización) en aves paseriformes. Precisamente, estos despliegues son caracteres de *certificado de salud*, que inciden sobre la selección sexual.

Asimetría fluctuante y parasitismo: Bajo condiciones ideales, un embrión desarrolla simetría bilateral perfecta; sin embargo, ciertas perturbaciones durante el desarrollo pueden ocasionar desviaciones de la asimetría en algunos caracteres. La asimetría fluctuante mide estas pequeñas desviaciones al azar en un carácter morfológico dado. Los factores que afectan la estabilidad del desarrollo son bien conocidos e incluyen el parasitismo (Palmer, 1994). La asimetría fluctuante puede ser importante en la selección sexual. Diversos estudios sugieren que los individuos más simétricos tienen mayor adecuación (Grether, 1997; Pither & Taylor, 2000; Benítez *et al.* 2008).

Thornhill (1992) discutió la idea que los parásitos puedan estar involucrados en la producción de asimetría fluctuante. Los parásitos pueden causar asimetría fluctuante al competir

con sus hospederos por nutrientes disponibles durante su desarrollo, comprometiendo su metabolismo, su desarrollo, su tasa de crecimiento, entre otros. Además, el parásito puede ser responsable de efectos patológicos específicos en ciertas partes del cuerpo del hospedero que, eventualmente, ocasionarán asimetría fluctuante. Si los parásitos aumentan la asimetría fluctuante de sus hospederos pueden afectar así su éxito de apareamiento. Si la simetría es un indicativo de *genes buenos*, las hembras podrán usarla para evaluar la calidad de sus parejas. Más aún, si el parasitismo aumenta la asimetría fluctuante, la selección sexual favorecerá a los individuos libres de parásitos y esto podría resultar en la evolución de resistencia a parásitos (Polak, 1997).

Aunque existe evidencia que la asimetría fluctuante tiene un efecto negativo en el éxito reproductivo y que los parásitos aumentan la asimetría fluctuante de sus hospederos, el efecto de los parásitos en el éxito reproductivo, debido a asimetría fluctuante inducida, no ha sido demostrado definitivamente.

Parasitismo y aislamiento reproductivo: Algunos parásitos pueden causar incompatibilidad reproductiva entre poblaciones de hospederos. La bacteria *Wolbachia* es común a un gran número de artrópodos, su transmisión es principalmente vertical y es causante de incompatibilidad reproductiva en el hospedero. El cruce entre machos y hembras infectados no se ve afectado y resulta en descendencia viable; no obstante, si el apareamiento ocurre entre hembras no infectadas y machos infectados, la bacteria causa incompatibilidad citoplásmica al impedir la incorporación de los cromosomas masculinos al óvulo fertilizado y el desarrollo se interrumpe. Si los hospederos son tratados con antibióticos que acaben con la bacteria, la incompatibilidad desaparece y el aislamiento reproductivo termina. Desde un punto de vista evolutivo, si el aislamiento reproductivo entre poblaciones es mantenido a lo largo del tiempo, ocurrirán fenómenos de especiación (Thompson, 1994).

Tres diferentes tipos de especiación inducida por parásitos han sido propuestos basados en la reducción de la viabilidad o la fertilidad de los hospederos (Thompson, 1987). En una interacción, un parásito heredado citoplasmáticamente reduce la viabilidad o fertilidad de los híbridos en cruces entre poblaciones incompatibles y ocurre especiación por inferioridad de los híbridos. También es posible que el parásito cause esterilidad en los machos de algunas poblaciones, favoreciendo la evolución de especies hermanas partenogénicas. En una tercera interacción, un parásito heredado no citoplásmico como *Plasmodium* sp. puede tener un efecto detrimental mayor en algunas poblaciones que en otras, favoreciendo una vez más el proceso de especiación, por selección, contra organismos híbridos.

La idea de coevolución parásito-hospedero y una simultánea especiación ha sido uno de los conceptos unificadores de la parasitología, hasta tal punto que se ha formalizado en una serie de leyes que se complementan y no son excluyentes entre sí, como se presentan en la tabla 2.

Transferencia génica: La teoría evolutiva interpreta la evolución como el producto de variación generada por mutación al azar y recombinación, con la selección natural actuando en la variación producida; sin embargo, en años recientes, la idea de transferencia génica horizontal ha recibido mucha atención. La transferencia génica horizontal se define como

Tabla 2. “Reglas” en el estudio de coevolución parásito-hospedero (Tomado de Stuart & Strier, 1995).

Regla de Farenholz	La filogenia del parásito semeja la filogenia del hospedero.
Regla de Szidat	Entre más primitivo es el hospedero más primitivos son los parásitos que él alberga.
Reglas de Manter	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Los parásitos evolucionan más lentamente que los hospederos.</li> <li>• Entre mayor sea la asociación con un grupo de hospederos mayor es la especificidad exhibida por un grupo de parásitos.</li> <li>• Una especie de hospedero alberga el mayor número de especies de parásitos en el área donde han residido por el mayor tiempo, de tal forma que si la misma o dos especies de hospederos relacionadas exhiben la misma distribución y fauna de parásitos, las áreas en las cuales los hospederos ocurren deben haber sido contiguas en el pasado.</li> </ul>
Regla de Eichler	Entre mayor sea el número de parásitos que un hospedero alberga mayor es el grupo sistemático, al cual, el hospedero pertenece.

la transferencia no sexual de información genética entre los genomas de organismos de diferente especie.

Se sabe que este fenómeno ocurre, principalmente, en organismos procariotes, pero la transferencia entre procariotes y eucariotes y entre eucariotes parece haber ocurrido también (Kidwell, 1993). El mecanismo para la transferencia horizontal de genes entre procariotes incluye transformación, conjugación y transducción; no obstante, en eucariotes, normalmente se requiere un vector para transportar las secuencias de ADN entre especies reproductivamente aisladas. Varios virus y posiblemente un ácaro han sido identificados como vectores efectivos (Bush *et al.* 2001).

La idea de transferencia génica en IPH fue introducida por Howell (1985), basada, principalmente, en la habilidad de algunos parásitos de producir moléculas similares a las de su hospedero (antígenos) y así evitar el reconocimiento. Tal fenómeno sería posible si los parásitos tienen genomas con secuencias de ADN idénticas o cercanamente relacionadas a la del hospedero (ADN homólogo). Este tipo de homología podría ser el producto de conservación a largo plazo o de un cambio adaptativo más reciente, a través de mutación, de recombinación y de selección. Howell (1985) indica que estas homologías en el ADN pueden ser el producto de la

incorporación directa del material genético del hospedero al genoma del parásito. Este proceso de transferencia genética interespecífica puede ser un flujo bidireccional de hospedero a parásito y viceversa. La incorporación del material genético del parásito por el hospedero puede llevar a la tolerancia del parásito. Por otro lado, la incorporación del ADN del hospedero por el parásito puede llevar a la expresión de macromoléculas por el parásito, facilitando la evasión de la respuesta inmune.

En la actualidad, la evidencia para este fenómeno entre parásitos y hospederos es poca y no existe evidencia directa de este intercambio génico. Evidencia circunstancial incluye la similitud entre el colágeno humano y el de *Ascaris* (Michaeli *et al.* 1972), la habilidad de *Fasciola hepatica* de sintetizar sustancias de la sangre humana (Damian, 1979) y la presencia de ADN de ratón en uno de sus parásitos, *Schistosoma japonicum* (Iwamura *et al.* 1991). En este último caso, el ADN del hospedero fue aparentemente integrado al genoma de adultos parásitos y fue detectable en los huevos.

Existe un caso bien documentado, en el que un ácaro semiparasítico, *Proctolaelaps regalis*, logró la transferencia de genes entre dos especies de *Drosophila*, alimentándose de los huevos de *Drosophila* sp. perforando los huevos

cercanos con sus quelíceros (Houck, 1994). Este comportamiento de alimentación provee potencial para la transferencia de inclusiones celulares, conteniendo ADN, de un hospedero a otro, conforme los huevos son perforados y el material de uno es accidentalmente transferido a otro. Este comportamiento simula la microinyección de huevos usados por investigadores en la transferencia de genes intra e interespecífica en *Drosophila* sp.

En resumen, la transferencia horizontal de genes entre parásito y hospedero es una fuente potencial de variación sobre la que la selección natural puede operar. Aún si la frecuencia del fenómeno es baja puede tener un profundo impacto en la filogenia de muchos grupos (Rhode, 1990). En este contexto, la sistemática filogenética basada en datos moleculares no sería totalmente confiable, debido a la posible transferencia genética entre especies no relacionadas. Bajo esta perspectiva, el mosaico evolutivo (con la transferencia genética actuando como fuente de unidades evolutivas aisladas) podría explicar, por ejemplo, la evidencia contradictoria en las relaciones de algunos taxa parasíticos (Bush *et al.* 2001).

Tanto el modelo de pares únicos como el de multiparásitos, se restringe a parásitos y, por lo tanto, sólo considera las defensas relacionadas con la interacción parásito-hospedero. Una evaluación correcta de la importancia de la HRR requiere que todos los tipos de defensa se consideren, así como sus costos y compromisos, lo que debilita la hipótesis pues todas las defensas provienen de la misma poza de recursos comunes (Martens & Schön, 2000).

## Conclusiones

La revisión y la discusión realizada sobre las teorías existentes sobre la evolución de las IPH permiten concluir que está sujeta a estudios que las apoyan y a otros que la critican. Lo anterior es en parte, debido a los diferentes grados de especialismo y generalismo exhibidos por varios taxa de parásitos hacia sus hospederos intermediarios y definitivos. Adicionalmente, se debe a que, a pesar que las técnicas de sistemática filogenética han producido interesantes ejemplos de radiación conjunta en algunos grupos de hospederos sujetos a un vasto estudio (por ejemplo, *Enterobius* y primates), la mayoría de especies de parásitos aun deben ser descritas por la sistemática. Esto evidencia la falta de información que, a la larga, puede generar sesgos potenciales en estudios que pretendan construir filogenias coevolutivas en grupos de hospederos poco estudiados.

Algunos principios modernos ecológicos y evolutivos sugieren que la aplicación de los conceptos generales de

coevolución parásito-hospedero no son siempre justificados. Quizás porque la información disponible es incompleta, se desconoce la especificidad que muchos parásitos pueden tener por algunos hospederos y la presencia o ausencia de un hospedero intermediario en el ciclo de vida de un parásito puede afectar el nivel de coespeciación con el hospedero definitivo. Adicionalmente, la presencia o ausencia de especies de parásitos en un hospedero determinado puede reflejar factores ecológicos más que coevolución *per se*.

Bajo este contexto, la evolución de las IPH es compleja pues, la interacción en sí misma, es un evento complejo. Los parásitos, generalmente, evolucionan a una tasa de transmisión máxima justo por debajo del límite de extinción del hospedero, es decir, los parásitos no evolucionan a una tasa de infección lo suficientemente alta para causar extinción de sus hospederos y, por lo tanto, de sí mismos.

A pesar de los estudios en contra de la teoría de coevolución hospedero-parásito, el uso de información sobre la ocurrencia de parásitos permite evaluar eventos evolutivos. De ahí que se pueda estimar el origen de un taxón en ausencia de registro fósil y determinar su biogeografía. De la misma forma, es posible clarificar la naturaleza de una serie de eventos de colonización y especiación; sin embargo, el tener clara esta generalidad es sólo un primer paso hacia el sinfín de posibles resultados evolutivos de la interacción. Como se ha visto antes, tal interacción se puede complicar en gran manera al considerar otros factores, como las interacciones con otros parásitos dentro de un mismo organismo o la influencia de factores genéticos, ambientales y ecológicos en estas interacciones.

**Agradecimientos:** A los árbitros quienes revisaron el manuscrito inicial. **Conflicto de intereses:** El manuscrito fue revisado y preparado por el autor quien declara que no existe ningún conflicto de intereses que ponga en riesgo los resultados presentados.

## BIBLIOGRAFÍA

1. ADAMO, S.A. 1999. Evidence for adaptative changes in egg laying in cricket exposed to bacteria and parasites. *Animal Behaviour*. 57:117-124.
2. AGRAWAL, F.A.; LIVELY, C.M. 2001. Parasites and the evolution of self- fertilization. *Evolution*. 55(5):869-879.
3. ALLISON, A.C. 1982. Coevolution between host and infectious diseases agents and its effects on virulence. En : Anderson, R.M.; May, R.M. eds. *Population biology of infectious diseases*. Oxford University Press, (Oxford, USA). p.245-268.

4. ANDERSON, R.M. 1991. Populations and infectious diseases: ecology or epidemiology? *J. Animal Ecol.* 60:1-50.
5. BAER, B.; SCHMID-HEMPEL, P. 1999. Experimental variation in polyandry affects a parasite loads and fitness in a bumblebee. *Nature.* 397:151-154.
6. BAER, B.; SCHMID-HEMPEL, P. 2001. Unexpected consequences of polyandry for parasitism and fitness in the bumblebee (*Bombus terrestris*). *Evolution.* 55(8):1639-1643.
7. BARLOW, N.D. 1996. The ecology of wildlife disease control: simple models revisited. *J. Appl. Ecol.* 33:303-314.
8. BEGON, M.; HARPER, J.L.; TOWNSEND, C.R. 1986. *Ecology: Individuals, populations and communities.* Blackwell Science Publications. (New York, USA). 486p.
9. BENÍTEZ, H.; BRIONES, R.; JEREZ, V. 2008. Asimetría fluctuante en dos poblaciones de *Ceroglossus chilensis* (Eschscholtz, 1829) (Coleoptera: Carabidae) en el agroecosistema *Pinus radiata* D. Don región del Bio-Bio, Chile. *Gayana.* 72(2):131-139.
10. BOOTS, M.; SASAKI, A. 2001. Parasite-driven extinction in spatially explicit host-parasite systems. *Am. Naturalist.* 34(12):706-713.
11. BUSH, A.O.; FERNÁNDEZ, J.C.; ESCH, G.W.; SEED, J.R. 2001. *Parasitism. The diversity and ecology of animal parasites.* Cambridge University Press. (Cambridge, UK). 566p.
12. CARIUS, H.J.; LITTLE, T.J.; EBERT, D. 2001. Genetic variation in host-parasite association: potencial for coevolution and frequency-dependent selection. *Evolution.* 55(6):1136-1145.
13. CUNNINGHAM, A.; DASZAK, P.; RODRÍGUEZ, J. 2003. Pathogen pollution: defining a parasitological threat to biodiversity conservation. *J. Parasitol.* 89 (Suppl.):S78-S83.
14. DAMIAN, R.T. 1979. Molecular mimicry in biology adaptation. En: Nickol, B.B. ed. *Host-Parasite Interfaces.* Academic Press. (USA). p.103-126.
15. DASZAK, P.; CUNNINGHAM, A.; HYATT, A. 2003. Infectious disease and amphibian population declines. *Diversity and Distributions.* 9:141-150.
16. DYBDAHL, M.F.; LIVELY, C.M. 1998. Host-parasite coevolution: Evidence for rare advantage and time lagged selection in a natural polulation. *Evolution.* 52:1057-1066.
17. DOBSON, A.P.; HUDSON, P.J. 1992. Regulation and stability of a free-living host-parasite system: *Trichostrongylus tenuis* in red grouse. II. Population models. *J. Anim. Ecol.* 61:487-498.
18. EWALD, P.W. 1995. The evolution of virulence: a unifying link between parasitology and ecology. *J. Parasitol.* 81:659-669.
19. FUTUYMA, D.J. 1986. *Evolutionary Biology.* Sinauer Associates. (USA).
20. GANDON, S.; AGNEW, P.; MICHALAKIS, Y. 2002. Coevolution between parasite virulence and host life-history traits. *Am. Natural.* 160(3):374-387.
21. GANDON, S.; VAN ZANDT, P.A. 1998. Local adaptation and host-parasite interactions. *Trends in Ecology and Evolution.* 13(6):214-216.
22. GREETHER, G.F. 1997. Survival cost of an intrasexual selected ornament in a damselfly. *Proc. Royal Soc. London* 264:207-210.
23. GÜLLAND, F.M.D. 1998. Impact of infectious diseases of wild animal population – a review. En: Grenfell, B.T.; Dobson, A.P. eds. *Ecology of infectious diseases in natural populations.* Cambridge University Press. (Cambridge, U.K). p.20-51.
24. HAFNER, M.S.; NADLER, S.A. 1990. Cospeciation in host-parasite assemblages: comparative analysis of rates of evolution and timing of cospeciation events. *Syst. Zool.* 39:192-204.
25. HAMILTON, W.D.; ZUK, M. 1982. Heritable true fitness and bright birds: a role for parasites? *Science.* 218:384-387.
26. HOUCK, M.A. 1994. Mites as potential horizontal transfer vector of eukatyotic mobile genes: *Proctolaelaps regalis* as a model. *J. Parasitol.* 80:457-469.
27. HOWELL, M.J. 1985. Gene exchange between hosts and parasites. *Internal J. Parasitol.* 15: 597-600.
28. IWAMURA, Y.; IRIE, Y.; KOMINAMI, R.; NARA, T.; YASURAOKA, K. 1991. Existence of host-related DNA

- sequences in the schistosome genome. *Parasitol.* 102:397-403.
29. JOHNSON, S.G. 2000. Population structure, parasitism, and survivorship of sexual and autodiploid parthenogenetic *Campeloma limun*. *Evolution.* 54(1):167-175.
  30. KELLY, A.; HATCHER, M.J.; EVANS, L.; DUNN, A.M. 2001. Mate choice and mate guarding under the influence of a vertically transmitted, parasitic sex ratio distorter. *Anim. Behaviour.* 61:763-770.
  31. KIDWELL, M.G. 1993. Lateral transfer in natural populations of eukariotes. *Ann. Rev. Genetics.* 27:235-256.
  32. KOSKELA, T. 2002. Variation in life-history traits among *Urtica dioica* populations with different history in parasitism by the holoparasitic plant *Cuscuta europeae*. *Evol. Ecol.* 16:433-454.
  33. LIVELY, C.M. 1992. Parthenogenesis in a freshwater snail: reproductive assurance versus parasitic release. *Evolution.* 46:907-913.
  34. LIVELY, C.; APANIUS, V. 1998. Genetic diversity in host-parasite interactions. p. 421-449. En: Grenfell, B.; Dobson, A. eds. *Ecology of infectious diseases in natural populations.* Cambridge University Press. (Cambridge, RU). p.421-449.
  35. LIVELY, C.M.; CRADOCCI, C.; VRIJENHOEK, R.C. 1990. Red Queen Hypothesis supported by parasitism in clonal and sexual fish. *Nature* 344:864-866.
  36. LYLES, A.M.; DOBSON, A.P. 1993. Infectious disease and intensive management: population dynamics, threatened hosts, and their parasites. *J. Zoo and Wildlife Med.* 24(3):315-326.
  37. LYTHGOE, K.A. 2000. The coevolution of parasites with host-acquired immunity and the evolution of sex. *Evolution.* 54(4):1142-1156.
  38. MARTENS, K.; SCHÖN, I. 2000. Parasites, predators and the Red Queen. *Trends in Ecology & Evolution.* 15: 392-393.
  39. MICHAELI, D.; SENYK, G.; MAOZ, A.; FUCHS, S. 1972. *Ascaris* cuticle collagen and mammalian collagens: cell mediated and humoral immunity relationships. *J. Immunol.* 109:103-109.
  40. MOCK, B.A.; GILL, D.E. 1984. The infrapopulation dynamics of trypanosomes in red-spotted newts. *Parasitol.* 88:267-282.
  41. O'BRIEN, S.J.; EVERMANN, J.F. 1988. Interactive influence of infectious disease and genetic diversity in natural populations. *Trends in Ecol. and Evol.* 3(10):254-259.
  42. OWENS, I. 2002. Male-only care and classical polyandry in birds: phylogeny, ecology and sex differences in remating opportunities. *Phil. Trans. R. Soc. Lond.* 357:283-293.
  43. PALMER, A.R. 1994. Fluctuating asymmetry analyses: a primer. En: Markow, T.A. ed. *Developmental instability: its origins and evolutionary implications.* Kluwer Publishers. (Dutrecht, Holanda). p.335-364.
  44. PITHER, J.; TAYLOR, P.D. 2000. Directional and fluctuating asymmetry in the black-wing damselfly *Calopteryx maculata* (Beauvois) (Odonata: Calpterygidae). *Can. J. Zool.* 78:1740-1748.
  45. POLAK, M. 1997. Ectoparasitism in mother causes higher positional fluctuating asymmetry in their sons: implications for sexual selection. *Am. Nat.* 149: 955-974.
  46. PROCTOR, H.; OWENS, I. 2000. Mites and birds: diversity, parasitism and coevolution. *Trends in Ecology and Evolution.* 15(9):358-364.
  47. RHODE, K. 1990. Phylogeny of platyhelminthes, with special reference to parasitic groups. *Internat. J. Parasitol.* 20:979-1007.
  48. RICO-HERNÁNDEZ, G. 2004. Implicaciones de enfermedades infecciosas en la conservación de fauna silvestre de vida libre. *Rev. U.D.C.A Act. & Div. Cient.* 7(1):59-67.
  49. RICO-HERNÁNDEZ, G.; JUAN-SALLÉS, C.; GARNER, M.M.; BARR, B.C. 2004. Pulmonary besnoitiasis in patagonian hare (*Dolichotis patagonum*) associated with interstitial pneumonia. *Vet. Pathol.* 41:408-411.
  50. SANTOS-ANGONESI, P.; ALMEIDA-SILVA, B.; LUCENA-MENDES, S.; DOS SANTOS PYRRHO, A. 2009. Endoparasitos em Muriquis-Do-Norte, *Brachyteles hypoxanthus*, Isolados em Pequeno Fragmento de Mata Atlantica. *Neotropical Primates* 16(1): 15-17.

51. SCARPASSA, V.M.; TADEI, W.P.; KERR, W. 1992. Biology of amazonian anopheline mosquitoes. XVI. Evidence of multiple insemination (Poliandry) in *Anopheles nuneztovari* Gabaldoni, 1940 (Diptera:Culicidae). Rev. Brasil. Genet. 15(1):51-64.
52. SCOTT, M.E. 1988. The impact of infection and disease on animal populations: Implications for conservation biology. Conservation Biology. 2:40-56.
53. SHERMAN, P.W.; SEELEY, T.D.; REEVE, H.K. 1988. Parasites, pathogens and polyandry in social Hymenoptera. American Nat. 131:602-610.
54. SHYKOFF, J.A.; BUCHELI, E.; KALTZ, O. 1996. Flower lifespan and disease risk. Nature. 379: 799.
55. STONER, K.E.; GONZÁLEZ-DI PIERRO, A.M.; MALDONADO-LÓPEZ, S. 2005. Infecciones de parásitos intestinales de primates: Implicaciones para la conservación. Universidad y Ciencia. Número Especial II: 61-72.
56. STUART, M.D.; STRIER, K.B. 1995. Primates and parasites: a case for a multidisciplinary approach. Internal J. Primatol. 16(4):577-593.
57. THOMPSON, J.N. 1987. Symbiont-induced speciation. Biol. J. Linnean Soc. 32:385-393.
58. THOMPSON, J.N. 1994. The coevolutionary process. University of Chicago Press. (Chicago, USA). 376p.
59. THORNHILL, R. 1992. Fluctuating assymetry and the mating system of the Japanese scorpionfly. Animal Behavior. 43:867-879.
60. VALDESPINO, C.; RICO-HERNÁNDEZ, G.; MANDUJANO, S. 2010. Gastrointestinal parasites of howler monkeys (*Alouatta palliata*) inhabiting the fragmented landscape of the Santa Marta mountain range, Veracruz, Mexico. Am. J. Primatol. 71:1-10.
61. WEST, S.A.; LIVELY, C.M.; READ, A.F. 1999. A pluralist approach to sex and recombination. J. Evol. Biol. 12:1003-1012.
62. YAN, G.; SEVERSON, D.W.; CHRISTENSEN, B.M. 1997. Costs and benefits of mosquito refractoriness to malaria parasites: implications for genetic variability of mosquitoes and genetic control of malaria. Evolution 51:441-450.

Recibido: Marzo 24 de 2010

Aceptado: Junio 9 de 2011

# **CARACTERIZACIÓN AMBIENTAL DE LA CIÉNAGA DE LA QUINTA LOCALIZADA EN CARTAGENA DE INDIAS, COLOMBIA, 2009 - 2010**

## **ENVIRONMENTAL CHARACTERIZATION OF THE CIENAGA DE LA QUINTA LOCATED IN CARTAGENA, COLOMBIA, 2009 - 2010**

Omar Tirado<sup>1</sup>, Ganiveth Manjarrez<sup>2</sup>, Claudia Díaz<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Ingeniero Químico, Esp. Ing Ambiental, Docente Investigador. Fundación Universitaria Tecnológico Comfenalco - Cartagena. Cartagena, Bolívar (Colombia). Barrio España, Carrera 44D N° 30<sup>a</sup>-91. e-mail: otirado@tecnologicocomfenalco.edu.co <sup>2</sup> Bacterióloga, Microbióloga M.Sc., Coordinadora de Investigaciones, programas ambientales – Fundación Universitaria Tecnológico Comfenalco - Cartagena. Cartagena, Bolívar (Colombia). Barrio España, Carrera 44D N° 30<sup>a</sup>-91. e-mail: gmanjarrez@tecnologicocomfenalco.edu.co <sup>3</sup> Ingeniera Civil, Esp. Ing Sanitaria y Ambiental, Docente Investigadora. Fundación Universitaria Tecnológico Comfenalco - Cartagena. Cartagena, Bolívar (Colombia). Barrio España Carrera 44D N° 30<sup>a</sup>-91. e-mail: ing.claudia.diaz@gmail.com

Rev. U.D.C.A Act. & Div. Cient. 14(2): 131 - 139, 2011

### **RESUMEN**

Cartagena de Indias posee diversidad de ecosistemas marinos, los cuales, la convierten en una importante ciudad de Colombia. La Ciénaga de la Quinta es uno de los cuerpos de agua que conforma el sistema hídrico marino lagunar de esta capital caribeña; tiene su propia dinámica hídrica hacia el mercado de Bazurto, con una velocidad de, aproximadamente, 0,06m/s, la que es muy baja para dispersar contaminantes. Este cuerpo de agua ha actuado como receptor de disposición final de los residuos del mercado de Bazurto, por lo que, en la actualidad, es evidente su sedimentación y su contaminación por residuos sólidos y líquidos. De igual manera, existe generación de olores ofensivos, vectores y una grave problemática social en torno a éste. La caracterización ambiental del ecosistema, se realizó a través de un estudio exploratorio, utilizando indicadores fisicoquímicos, microbiológicos para las aguas, clasificación de estratos edáficos y cuantificación de metales pesados. Es de resaltar que las concentraciones del oxígeno disuelto, coliformes fecales, materia orgánica y metales pesados, afectan la calidad del agua y sobrepasan los límites admisibles para preservación de flora y fauna en aguas marinas. Así mismo, las condiciones de humedad natural y los contenidos de material orgánica del suelo fueron elevados, generando situación de compresibilidad, evidencias de rellenos y capas de mangle en descomposición.

Palabras clave: Ciénaga, coliformes, metales pesados.

### **SUMMARY**

Cartagena de Indias shows a diversity of marine ecosystems, that turns it into an significant town in Colombia. The marsh "la Quinta" is one of the water bodies comprising the ocean water lagoon system of Cartagena, having its own hydric dynamics toward the "Bazurto" market, with a speed of approximately 0.06m/s, rate which is very low to disperse pollutants. This water body has acted as a final disposal of waste coming from the Bazurto market, therefore sedimentation and pollution from solid and liquid waste is actually evident. Equally it generates offensive odors, vectors and causes serious social problems in its surroundings. The environmental characterization of this ecosystem was carried out through an exploratory study, using physical-chemical indicators, microbiological ones for water characterization, classification of soil strata and quantification of heavy metals. It is notable to highlight that the concentrations of dissolved oxygen, fecal coliforms, organic matter and heavy metals, affect the water quality and exceeds the permitted limits acceptable for the preservation of flora and fauna in marine waters. Also the conditions of natural moisture and soil organic material content are elevated, generating compressible situation, evidence of land fillings and layers of decaying mangrove.

Key words: Marsh, coliforms, heavy metals.

## INTRODUCCIÓN

Los humedales son ecosistemas dinámicos, cuyo componente fundamental es el agua, en torno, a la cual, se forman ambientes intermedios que varían entre permanentemente inundados y normalmente secos e, incluyen, todos los niveles de diversidad biológica que se puedan sustentar. Sus características físicas se moldean con frecuencia gracias a procesos endógenos, como la sedimentación y la desecación y a procesos exógenos, como inundaciones (Castellanos, 2001).

Los humedales, como las ciénagas, representan numerosos beneficios relacionados con sus funciones ecológicas y ambientales, debido a que sirven de soporte de actividades productivas y socio-culturales y mantienen la biodiversidad (Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 2007).

Colombia cuenta con alrededor de 20 millones de hectáreas de humedales, entre los que se encuentran las ciénagas (Velásquez *et al.* 2007). En la costa Caribe colombiana, se registra la mayor variación en cuanto a humedales costeros del país se refiere: ribereños, lacustres, palustres, marinos y estuarinos; de amplias playas arenosas y fondos lodosos y forman parte de estos ecosistemas, la ciénaga Grande del Magdalena, la desembocadura de los ríos Sinú y Atrato, la bahía de Cartagena y la Ciénaga de las Quintas, entre muchos otros (Rangel *et al.* 1997).

El problema ambiental del sistema de caños, de lagos y de ciénagas del Distrito de Cartagena es conocido en el ámbito nacional, desde hace más de medio siglo. Esta problemática ha aumentado, a medida que la capacidad de autorregulación de los cuerpos de agua es insuficiente para degradar la materia orgánica proveniente de las descargas de aguas residuales negras y de residuos sólidos que a estos cuerpos son arrojados (Beltrán & Suárez, 2010).

Uno de los sistemas acuáticos más afectados es la “Ciénaga de la Quinta”, que se encuentra en estado deplorable, debido, principalmente, a los impactos provocados por el desarrollo de actividades antrópicas, a pesar de que el informe “Cartagena como Vamos”, de 2009, reporta todos sus parámetros en niveles normales.

La ciénaga de la Quinta forma parte integral del sistema de ciénagas y de lagunas de Cartagena y debido a su localización es impactada negativamente por el funcionamiento del mercado de Bazurto. La ciénaga, se comunica con los otros cuerpos de agua de la cual forma parte activa, por medio de las corrientes de intercambio (flujo de materiales) y de la dinámica hídrica (ciénaga de Chambacú, San Lázaro, caño

de Juan Angola y Ciénaga de la Virgen), hasta salir al mar, a través de la Bocana estabilizada de mareas. En esta ciénaga, se observan especies de mangle rojo (*Rhizophora mangle*) y mangle prieto (*Avicennia germinans*), con funciones de salas cunas de alevinos y otras especies, que hacen de esta ciénaga un ecosistema rico en especies de flora y de fauna. Se resalta que esta flora tiene una función depuradora de las aguas altamente contaminadas de la ciénaga (EPA, Cartagena, 2006); sin embargo, en los últimos años, ha sido objeto de rellenos ilegales e invasiones, loteo y construcción de viviendas. Es de resaltar el caso relacionado con el asentamiento denominado “La islita”, ubicada en la Ciénaga de la Quinta y erradicada por la alcaldía de esta ciudad, en el 2008 (Beltrán & Suárez, 2010).

Además, la Ciénaga de la Quinta es utilizada como la principal zona de disposición de residuos de los comercializadores de pescado, de carne y de pollo, quienes indiscriminadamente vierten en esta las vísceras y demás productos, contaminando el agua y generando olores ofensivos. El volumen de residuos<sub>3</sub> producido por el Mercado de Bazurto alcanza cerca de 60m<sup>3</sup> o 15 toneladas (Disposición de basuras en Cartagena, 2007).

La recuperación de la zona que rodea el cuerpo de agua, se ha adelantado desde hace cinco años aproximadamente, incluyendo recuperación de espacios públicos ocupados, actividades como dragado, delimitación con cerca, construcción del paseo peatonal y erradicación de residuos sólidos. La orden para la recuperación y el saneamiento específico del cuerpo de agua, fue reiterada en segunda instancia por el tribunal administrativo del Departamento de Bolívar, en noviembre de 2010.

Para la caracterización ambiental del agua, se utilizaron indicadores de calidad ambiental y sanitaria, como los Coliformes totales y fecales (Rosenfeld, 2006; Shibata *et al.* 2004); además, se cuantificaron niveles de cadmio, plomo y mercurio en muestras de bentos y, para la caracterización del suelo, se realizó clasificación de estratos edáficos, mediante granulometría, límites de Atterberg y contenido de materia orgánica (ASTM, 2008).

## MATERIALES Y MÉTODOS

**Ubicación del área de estudio.** La Ciénaga de la Quinta hace parte del sistema de caños y lagos internos de la ciudad de Cartagena, como se presenta en la figura 1. Se encuentra localizada entre el puente Jiménez y el puente de Bazurto y se caracteriza por tener anchos entre 288 y 477m, con profundidad de 2,25m y un área total del espejo de agua de 30 hectáreas.

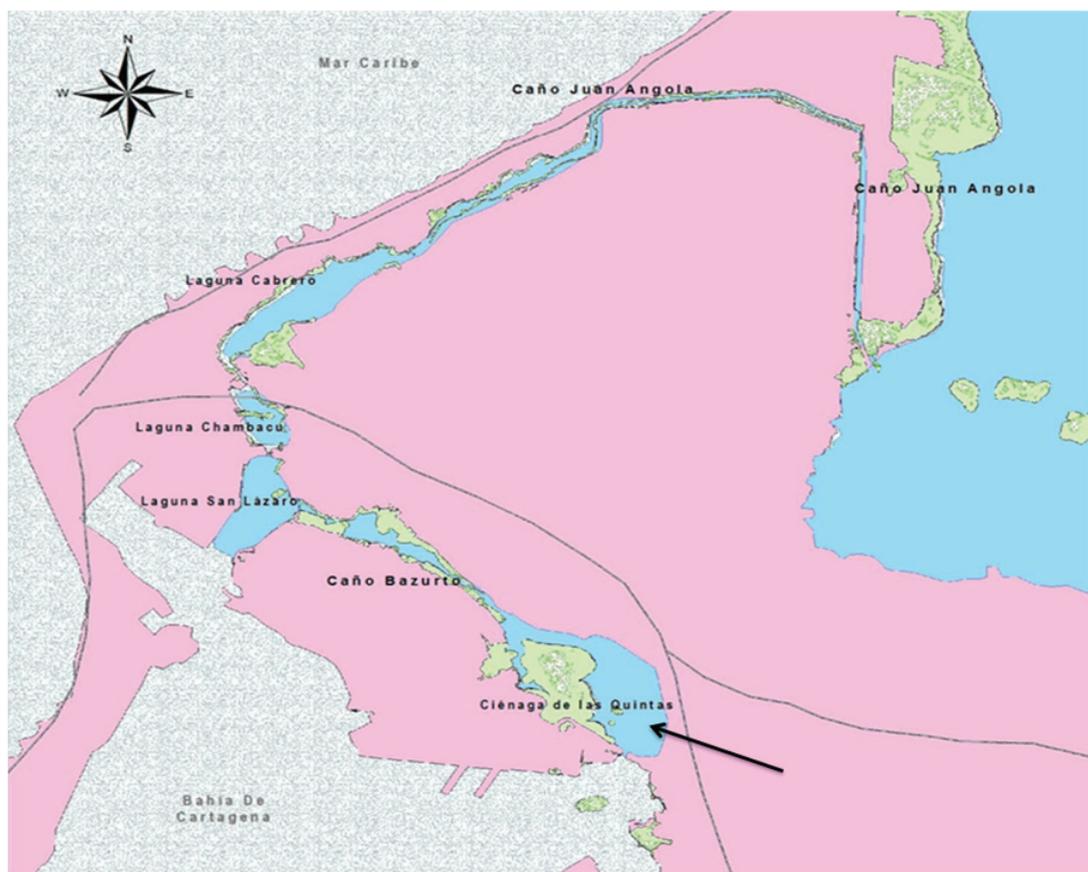


Figura 1. Ubicación geográfica de la zona de estudio (Fuente: Beltrán & Suárez, 2010).

La ciénaga, se localiza en la latitud  $10^{\circ}24'46''$  N y longitud  $75^{\circ}31'46''$  E (Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 2007).

**Determinación de los puntos de muestreo.** Para la caracterización de las aguas de la Ciénaga de la Quinta, se seleccionaron cuatro estaciones estratégicas, cuya georeferenciación se presenta en la tabla 1.

Tabla 1. Localización de las estaciones de muestreo de agua georeferenciada.

ESTACIONES	COORDENADAS
Estación 1	N: $10^{\circ} 24'46,64''$ O: $75^{\circ} 30' 46,79''$
Estación 2	N: $10^{\circ} 24' 41,56''$ O: $75^{\circ} 31' 31,34''$
Estación 3	N: $10^{\circ} 24' 22,22''$ O: $75^{\circ} 31' 24,15''$
Estación 4:	N: $10^{\circ}24'20,90''$ O: $75^{\circ}31'27,97''$

**Caracterización del recurso agua.** Se tomaron muestras de por duplicado en cada uno de los puntos, a una profundidad de 30cm, aproximadamente, de la superficie. Para ello, se utilizaron botellas de vidrio estériles de 100mL de capacidad y transportadas en refrigeración hasta el laboratorio de Ciencias Biológicas de la Facultad de Ingeniería, de la Fundación Universitaria Tecnológico Comfenalco.

Los parámetros físico químicos analizados en cada muestra fueron los siguientes: pH, conductividad, DBO, sólidos disueltos, salinidad y temperatura, utilizando un equipo de medición mutiparámetros: ref, HI 9828 / HANNA.

La determinación de la concentración de Coliformes Totales (CT), se llevó a cabo por medio del recuento indirecto en tubos múltiples de fermentación, expresado en el Número Más Probable (NMP) en 100 mililitros de agua, según recomendaciones de los métodos estándar (APHA, 1998),

**Caracterización del recurso suelo.** Para el estudio, se realizaron dos perforaciones tipo apiques identificadas como AP<sub>1</sub> y AP<sub>2</sub> de 0,5 y 1,0 metros de profundidad, en las zonas 2 y 3 (Tabla 1). Cabe resaltar que estos terrenos son el resultado de rellenos sucesivos efectuados en zonas marinas, durante el proceso de expansión de la ciudad (Beltrán & Suárez, 2010).

La caracterización del suelo, se ejecutó por exploración de campo, aplicando métodos manuales, consistentes en perforación, mediante utilización de pala draga y barreno.

Se tomaron muestras cada 0,5m hasta llegar a la profundidad máxima de exploración de 1,0m. Las muestras, debidamente almacenadas para conservación de humedad, fueron trasladadas al laboratorio para la ejecución de pruebas de Granulometría (ASTM D421-58 y D422-63), límites de Atterberg (ASTM D423-66, ASTM D 424-59), contenido de humedad y contenido de material orgánico (ASTM D2216-71).

**Identificación de metales pesados en bentos.** Para el análisis de metales pesados en muestras de bentos, se usaron botellas de Van Dorn, sin fijadores, ni preservativos (McNair & Chow-Fraser, 2003; Solomon *et al.* 2011). Además, se utilizó un muestreador de tubo (core samplers), para captar un perfil vertical del sedimento, en aguas someras. Se tomaron cinco muestras aleatorias y se mezclaron en una sola, con el objeto de promediar el valor de metales.

Los metales caracterizados fueron: cadmio, plomo y mercurio. La zona de muestreo, se localizó con un sistema de posicionamiento geográfico (GPS) y fueron equivalentes a las zonas enumeradas, como estación 1, 2, 3 y 4 (Tabla 1).

Posteriormente, estas muestras se llevaron a los laboratorios de la Corporación Autónoma Regional del Canal del Dique – CARDIQUE, para su respectiva caracterización, mediante la metodología del Standar Methods Edición 20 y de digestión ácida (SM3111-B y SM3112 – B).

**Análisis de información.** Los datos de concentraciones de Coliformes totales, parámetros físico químicos del agua y metales pesados fueron evaluados a través de análisis descriptivo, teniendo en cuenta las condiciones de la zona. Los resultados de metales pesados son expresados en peso seco. La caracterización de suelos, se realizó mediante la descripción de las características físicas encontradas en campo, como textura, estructura y olor; además, se determinó la composición porcentual de las partículas de suelo, con ensayos granulométricos y límites de consistencia, evaluando las condiciones ambientales de recuperación de la muestra.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

**Caracterización fisicoquímica y microbiológica del recurso agua.** En las cuatro estaciones de monitoreo, las concentraciones máximas de Coliformes Totales (CT) se presentaron en las estaciones uno y cuatro, con valores de 4,600 y 4,450 NMP/100mL, respectivamente, mientras que los valores más bajos, se encontraron en la estación dos, con una concentración mínima de 1100 NMP/100mL.

En relación con los coliformes fecales (CF), las máximas concentraciones se mostraron en las estaciones uno y cuatro, con valores de 1,500 y 1,900 NMP/100mL, respectivamente.

Es evidente los elevados valores de coliformes totales y fecales, teniendo en cuenta los criterios de calidad de agua admisible para la destinación del recurso para fines recreativos, mediante contacto primario o secundario (Decreto 1594, 1984), ocasionando, posiblemente, problemas de salubridad y de enfermedades de origen hídrico y, más aún, si se tiene en cuenta que en este sector se dan importantes actividades de intercambio comercial y uso de la ciénaga por indigentes.

Las estaciones uno y cuatro se encuentran influenciadas por el aporte de residuos sólidos orgánicos e inorgánicos provenientes de las actividades comerciales del mercado de Bazurto y las malas prácticas higiénicas de la población indigente, que yace alrededor de las mismas.

En la tabla 2, se reúnen los promedios de las determinaciones fisicoquímicas y microbiológicas de las cuatro estaciones de muestreo; en general, los niveles más de pH, temperatura, oxígeno disuelto y salinidad fueron muy heterogéneos en las diferentes estaciones.

Tabla 2. Resultados promedio de los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos en las estaciones de la Ciénaga de las Quinta, 2009 – 2010.

Parámetro	Estación 1	Estación 2	Estación 3	Estación 4	Media	DE
Oxígeno Disuelto (ppm)	4,5	7,77	4,98	4,98	5,55	1,49
pH	7,41	4,6	7,7	8,5	7,0525	1,69
Temperatura (°C)	29,18	29,09	28,91	27,8	28,745	0,63
Presión atmosférica (atm)	0,9942	0,9942	0,9944	0,9845	0,991	0,004
Conductividad (ms/cm)	39,62	43,66	41,98	43,15	42,102	1,79
Salinidad	25,09	25,82	26,82	27,32	26,2625	0,999
Sólidos suspendidos totales (tds ppt)	19,77	19,8	20,99	18,89	19,8625	0,862
CT (NMP/ML)	4,600	1,100	4,300	4,450	3,6125	1,6794
CF (NMP/ML)	1500	740	1120	1900	1315	498,363

Es importante anotar que no existe relación directa entre las variables fisicoquímicas (pH, temperatura, salinidad y oxígeno disuelto) con la concentración de CT y CF en ninguna de las estaciones, excepto en la estación tres, donde se observó que la salinidad y los sólidos suspendidos mostraron una influencia de tipo regular sobre el grupo de CT y CF (4,300 y 1,120 NMP/100mL, respectivamente).

La salinidad presentó una media de 26,25%, considerándose disminuida, si se compara con el estudio realizado por Beltrán & Suárez (2010), desarrollado entre 2007 y 2008, en el cual, determinaron que la salinidad de la Ciénaga oscilaba entre 35 y 36%, constituyéndose un índice de renovación de aguas; no obstante, el descenso de este parámetro en el 2009 - 2010 podría sugerir poco intercambio hídrico, por parte de la Ciénaga.

Los valores de pH obtenidos en la Ciénaga oscilaron entre 4,6 y 8,5 unidades. El valor mínimo, se presentó en la estación dos, correspondiente a la zona justo enfrente del mercado de Bazurto. Teniendo en cuenta que lo estipulado para fines recreativos es un pH de 5,0 a 9,0 unidades y para la destinación de recurso, con fines de conservación de flora y fauna en aguas estuarinas debe estar entre 6,5 y

8,5 unidades, se señala que esta acidificación podría estar relacionada con los procesos de degradación de residuos sólidos arrojados por los vendedores del mercado, que acidifican las aguas.

Este fenómeno de aguas ligeramente ácidas también fue reportado en la ciénaga de Paticos, en el complejo cenagoso de Ayapel (Córdoba) (Montoya & Aguirre, 2009), donde la variable pH presentó una estratificación definida durante todo el muestreo, con predominio de condiciones cercanas a la neutralidad en la mayor parte de la columna de agua y aguas ligeramente ácidas en la parte inferior de esta, debido a la resuspensión; sin embargo, la mayoría de los estudios reportan ciénagas con aguas alcalinas, como la Ciénaga el Eneal, en San Onofre (Sucre) y la Ciénaga de Paredes, en Santander (Ríos *et al.* 2008; Barón *et al.* 2006).

La concentración de sólidos está representada en la cantidad de materiales suspendidos en las aguas de la Ciénaga. Los sólidos suspendidos totales presentaron una media de  $19,860 \pm 0,43$  mg/L y estos resultados pueden estar asociados a la presencia de residuos sólidos, aguas residuales, escorrentías y al suelo arenoso. En el 2007, Beltrán & Suárez (2010) monitorearon este cuerpo de agua, antes de las recientes

actividades de dragado, teniendo, para entonces, resultados que oscilaban entre 37,548 y 41,062mg/L.

La mayoría de los cuerpos de agua requieren un mínimo de 5 a 6mg/L de oxígeno disuelto (OD). En la Ciénaga de la Quinta, los valores oscilaron entre 7,7 y 4,5mg/dL, permitiendo el soporte de la diversidad de la vida acuática; sin embargo, años atrás se había reportado en esta ciénaga muerte de peces y de aves, como resultado de los valores bajos de OD: 0,2mg/L (Beltrán & Suárez, 2010) lo que trajo consigo presencia de olores ofensivos y disminución de la producción de peces y macroinvertebrados.

Valores bajos de oxígeno disuelto también han sido reportados en horas de la madrugada en la Ciénaga el Eneal, de San Onofre, Sucre (Ríos *et al.* 2008), en la Ciénaga Colombia, en Cauca (Velásquez *et al.* 2007) y en el complejo cenagoso de Ayapel (Montoya & Aguirre, 2009). Teniendo en cuenta la actividad que se ejerce en los alrededores de la Ciénaga de la Quinta en horas de la madrugada, sería pertinente el monitoreo del oxígeno disuelto en estos períodos, para obtener puntos de comparación.

La literatura plantea evaluaciones contradictorias de indicadores fecales bacterianos relacionados con diferentes causas ambientales; tal es el caso de Talbert Marsh, un humedal de agua salada de las mareas en el Condado de Orange, junto a dos de las playas más conocidas en el sur de California (Huntington Beach y Newport Beach), donde los niveles de Coliformes están por debajo de los límites permisibles, tanto de CT como de *E. coli* (104 y 35 NMP/100mL, respectivamente) (Jeong *et al.* 2008). En contraste con el presente estudio y al tratarse también de un cuerpo de agua salino, los resultados difieren, probablemente, por el tipo de descargas y por la problemática ambiental y social de los alrededores de la ciénaga de la Quinta.

Un caso a destacar es en Oklahoma, en el llamado Deep Creek, donde el estudio realizado, con el propósito de confirmar los niveles elevados de bacterias coliformes totales y fecales, reveló altos valores: una media de  $12,901 \pm 10,817$  ufc/100mL y  $226 \pm 309$  ufc/100mL, respectivamente, teniendo en cuenta que la normativa en Oklahoma que regula el uso recreativo del agua es máximo de 126 ufc/100mL, de *E. coli* y de 406 ufc/100mL, para CT (O'Neal & Hollrah, 2007). Es evidente la alta carga bacteriana evidenciada en Oklahoma, debido a que los principales problemas que rodean Deep Creek son la erosión del suelo y la escorrentía (Kistemann *et al.* 2002). Otros problemas ambientales, como las precipitaciones y los usos del suelo para actividades, como ganadería y agricultura, suelen estar relacionadas con los altos niveles de coliformes, como en el caso de la bahía de Tillamook, una cuenca hidrográfica en Oregon, Estados Unidos (Sullivan *et al.* 2005).

En Colombia, diversas ciénagas han sido caracterizadas en los últimos años, como la ciénaga Mata de Palma, en el departamento del Cesar (Navia & Estupiñán, 2009); Ciénaga Grande de Santa Marta, en el Magdalena (Narváez *et al.* 2008); Ciénaga de Ayapel en Córdoba (Chalarca *et al.* 2007) y Ciénaga Colombia, en Cauca (Velásquez *et al.* 2007), entre otras. Lo interesante de todas estas caracterizaciones es que, al igual que en nuestro estudio, los valores de CT y CF superan los criterios de calidad de agua admisible para la destinación del recurso para fines recreativos, constituyéndose en importantes focos para la generación de problemas de salubridad y de enfermedades de origen hídrico y más aún si se tiene en cuenta que estos cuerpos de agua están relacionadas con actividades de intercambio comercial.

De acuerdo con los resultados obtenidos en el estudio microbiológico, se recomienda implementar monitoreos continuos de la calidad sanitaria de las aguas de la ciénaga y disminuir la carga de nutrientes que llegan a este cuerpo de agua, procedente de las diferentes actividades económicas desarrolladas en la zona, con el fin de controlar la multiplicación de los microorganismos patógenos y disminuir el riesgo de enfermedades en la población humana y animal aledaña.

**Caracterización del recurso suelo:** La zona de estudio presenta un tipo suelo homogéneo en cuanto a conformación y características de clasificación, siendo predominante la presencia de limos arenosos grises; en ambos casos, se encontró un fuerte olor a materia orgánica en descomposición, siendo considerablemente mayor en el apique dos. Caso semejante al encontrado en la Ciénaga Colombia, en Cauca (Velásquez *et al.* 2007), donde se reporta la formación de suelos, conformada por arcillas, por areniscas y por conglomerados estratificados, con suelos bien drenados y profundos (Velásquez *et al.* 2007).

Los contenidos de humedad encontrados son altos para este tipo de suelos, siendo un hallazgo importante la presencia de mangle en descomposición en mayor proporción en el apique dos, con un contenido de material orgánico superior al 90%, lo que indica la presencia de estratos blandos altamente comprensibles y que sugiere que en esta zona es un área natural de ecosistema de manglar; en oposición a lo anterior, los suelos de la ciénaga de Mallorquín, en el Atlántico, presentan una rápida oxidación de la materia orgánica y poca presencia de material orgánico en los estratos superficiales del suelo (Plan de Ordenación de la Cuenca de la Ciénaga de Mallorquín, 2006).

El nivel freático, se halló en el apique dos, a 0,4m de profundidad. El anterior parámetro es propio de la naturaleza

Tabla 3. Descripción de los resultados del análisis de suelo.

AP	MUESTRA		Densidad	RESIST	Materia Orgánica %	GRADACIÓN							ANÁLISIS DE CONSISTENCIA			CLASIFICACIÓN MECÁNICA			
	Profundidad m		Húmeda	Inconf		Porcentaje que pasa el tamiz							Humedad Natural %	Límite Líquido %	Índice de Plasticidad	U.S.C.			
No.	No.	DE	A	Kg/m <sup>3</sup>		3/4"	1/2 "	3/8"	No. 4	No. 10	No. 40	No. 100	No. 200						
1	1	0,0	0,5						100	97,1	93,8	77,0	68,0		44,90%	32%	6		mL
1	2	0,5	1,0					100	96,9	94,4	91,7	72,8	64,0		49,90%	35%	5		mL
2	1	0,0	0,5			100	93,4	90,4	88,8	87,6	86,0	82,0	80,0		79,50%	NL	NIP		mL
2	2	0,5	1,0					100	95,4	92,6	90,9	86,0	83,8		80,80%	NL	NIP		mL

del suelo, de su capacidad hidráulica y la relación con la existencia de cuerpos de agua cercano, por tal razón es un parámetro importante para el caso puntual de esta ciénaga, pero no amerita comparación con otras ciénagas similares.

Los datos de la caracterización de suelos de la zona son descritos en la tabla 3.

**Caracterización de metales pesados en bentos:** La contaminación del ambiente por metales pesados es un serio problema reconocido en el ámbito mundial. Los metales pesados, se destacan por su capacidad de concentración y de bioacumulación, razón que les faculta para ingresar en la cadena trófica (Motas *et al.* 2003).

Los valores reportados de cadmio (0,270mg/kg) están por encima de lo establecido en el decreto 1594 del 84, que regula que para el uso pecuario y destinación del recurso para preservación de flora y fauna, de aguas estuarinas, el criterio de calidad admisible es de 0,01mg/kg.

En relación con el plomo, los valores encontrados (27,30mg/kg) son altos al compararlos con el criterio de calidad admisible para aguas de uso pecuario, según lo establecido en el decreto 1594 del 84, que es de 0,1mg/kg. Se podría inferir que el origen de este metal en el sedimento se debe a la fabricación de redes de pesca de los moradores del Barrio Chino (Olivero, 2005). En cuanto al mercurio, la cantidad reportada (0,741mg/kg) es representativa como metal traza y esta concentración no representa peligro alguno. Las concentraciones del oxígeno disuelto, coliformes fecales y materia orgánica, están afectando, de manera directa, la calidad del agua, admisible para preservación de flora y fauna en aguas marinas.

Lo anterior, permite concluir que la calidad ambiental de las aguas de la Ciénaga de la Quinta, en los actuales momentos, no es apta para contacto primario y no es garantía de supervivencia para la flora y fauna aun existente en las áreas materia de estudio.

Todo tipo de vida depende de la calidad del agua para su supervivencia. Por ende, la protección de este recurso natural debe ser una política local y nacional. Para lograr lo anterior y, al mismo tiempo, un manejo adecuado de este cuerpo de agua, se hace necesario contar con indicadores que permitan evaluar su calidad.

El desarrollo de tales indicadores, se debe hacer con base en las funciones del agua que se evalúa, considerando aquellas propiedades bentónicas sensibles a los cambios del uso del recurso agua en esta zona de la ciudad. En materia de calidad de agua, se requiere ampliar la perspectiva original,

enfocada sólo a aguas marinas de carácter lagunar, como lo es la ciénaga de la Quinta, en la ciudad de Cartagena, para incluir también aguas de ecosistemas naturales y modificados, con fines específicos como el urbano.

**Conflictos de intereses:** El manuscrito fue preparado y revisado con la participación de todos los autores, quienes declaramos que no existe ningún conflicto de intereses que ponga en riesgo la validez de los resultados presentados.

## BIBLIOGRAFÍA

1. APHA. 1998. American Public Health Association, American Water Works Association, Water Pollution Control Federation, 20th Edition, Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. p.1-46.
2. ASTM. 2008. Capacitación en normas. Capacitación en normas para la construcción en México. Disponible desde internet en [http://www.astm.org/SNEWS/SPANISH/SPJF08/outreach\\_spjf08.html](http://www.astm.org/SNEWS/SPANISH/SPJF08/outreach_spjf08.html) (con acceso 08/10/10).
3. BARÓN, M.; GAVILÁN, R.; RAMÍREZ, J. 2006, Variabilidad espacial y temporal en la comunidad de cladóceros de la Ciénaga de Paredes (Santander, Colombia) a lo largo de un ciclo anual. *Limnetica*. 25(3):623-636.
4. BELTRÁN, A.; SUÁREZ, L. 2010, Diagnóstico ambiental de los cuerpos internos de agua de la ciudad de Cartagena de Indias, Ed. Eumed. 172p. Disponible desde internet en: [www.eumed.net/libros/2.10b/691/](http://www.eumed.net/libros/2.10b/691/) (con acceso el 10/11/10).
5. CASTELLANOS, C. 2001. Los ecosistemas de humedales en Colombia. *Revista Luna Azul*. 13(7):45-56.
6. CHALARCA, D.; MEJÍA, R.; AGUIRRE, N. 2007. Aproximación a la determinación del impacto de los vertimientos de las aguas residuales domésticas del municipio de Ayapel, sobre la calidad del agua de la ciénaga. *Rev. Facultad de Ingeniería. U. de Antioquia*. 40:41-58.
7. DECRETO 1594 DEL 26 DE JUNIO DE 1984. Disponible desde internet en <http://www.encolombia.com/medioambiente/humede decreto159484.htm> (con acceso el 10/11/10).
8. DISPOSICIÓN DE BASURAS EN CARTAGENA. 2007. Disponible desde internet en [http://www.cci.org.co/publicaciones/1\\_Oct-05-07%20Basuras%20en%20Cartagena.pdf](http://www.cci.org.co/publicaciones/1_Oct-05-07%20Basuras%20en%20Cartagena.pdf) (con acceso el 08/10/10).

9. ENTIDAD PÚBLICA AMBIENTAL. 2006. Disponible desde internet en <http://www.epacartagena.gov.co/doc/caracterizacion-manglares-urbanos-min.pdf> (con acceso el 10/10/10).
10. INFORME CARTAGENA CÓMO VAMOS. 2009. Disponible desde internet en: [http://www.cartagenacomovamos.org/temp\\_downloads/Resumen%20Ejecutivo%20EPC%202009%5B1%5D.pdf](http://www.cartagenacomovamos.org/temp_downloads/Resumen%20Ejecutivo%20EPC%202009%5B1%5D.pdf) (con acceso el 10/09/10).
11. JEONG, Y.; SANDERS, B.; MCLAUGHLIN, K.; GRANT, S. 2008. Treatment of dry weather urban runoff in tidal saltwater marshes: A longitudinal study of the Talbert Marsh in Southern California. *Environ. Sci. Technol.* 42:3609-3614.
12. KISTEMANN, T.; CLASSEN, T.; KOCH, C.; DANGENDORF, F.; FISCHER, R.; GEBEL, J.; VACATA, V.; EXNER, M. 2002. Microbial load of drinking water reservoir tributaries during extreme rainfall and runoff. *Appl. Environ. Microbiol.* 68(5):2188-2197.
13. MINISTERIO DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL. 2007. Resolución no. 978. Disponible desde internet en: [http://www.minambiente.gov.co/documentos/res\\_0978\\_040607.pdf](http://www.minambiente.gov.co/documentos/res_0978_040607.pdf) (con acceso el 10/11/10).
14. MCNAIR, S.; CHOW-FRASER, P. 2003. Change in biomass of benthic and planktonic algae along a disturbance gradient for 24 Great Lakes coastal wetlands. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 60: 676-689.
15. MOTAS-GUZMÁN, M.; ROMERO, D.; GARCÍA-DÍAZ, J.L.; GARCÍA-FERNÁNDEZ, A.J. 2003. Niveles de cadmio y plomo en hígado y riñón de équidos para consumo humano. *Rev. Toxicol.* 20(2):s.p.
16. MONTOYA, Y.; AGUIRRE, M. 2009. Cambios nictemerales de variables físicas y químicas en la Ciénaga de Paticos, complejo cenagoso de Ayapel, Colombia. *Rev. Biol. Trop.* 57(3):35-646.
17. NARVÁEZ, S.; GÓMEZ, M.; ACOSTA, J. 2008, Coliformes termotolerantes en aguas de las poblaciones costeras y palafíticas de la Ciénaga Grande de Santa Marta, Colombia. *Acta Biol. Col.* 13(3):115-124.
18. NAVIA, A.; ESTUPIÑÁN, S. 2009. Calidad sanitaria del agua de la ciénaga Mata de Palma en el Departamento del Cesar, Colombia. *NOVA.* 7(11):85-91.
19. OLIVERO, J. 2005, Niveles de plomo en sangre en niños de Cartagena Colombia, 2004 – 2005 Disponible desde internet en <http://reactivos.com/metales.html> (con acceso el 19/10/10).
20. O'NEAL, S.; HOLLRAH, D. 2007. Monitoring of Total Coliform and Escherichia coli Levels in a Second Order Stream in West-Central Oklahoma. *Proc. Okla. Acad. Sci.* 87:69-75.
21. PLAN DE ORDENACIÓN DE LA CUENCA DE LA CIÉNAGA DE MALLORQUÍN. 2006. Disponible desde internet en <http://www.crautonomia.gov.co> (con acceso el 21/02/011).
22. RANGEL, J.O.; LOWY, P.D.; AGUILAR, M. 1997. Colombia Diversidad Biótica II, Bogotá: Universidad Nacional de Colombia. p.383-402.
23. RÍOS, E.; PALACIO, J.; AGUIRRE, N. 2008. Variabilidad fisicoquímica del agua en la ciénaga El Eneal, reserva natural Sanguaré municipio de San Onofre-Sucre, Colombia. *Rev. Fac. Ing. Univ. Antioquia.* 46:39-45.
24. ROSENFELD, L. 2006. Temporal and spatial variability of fecal indicator bacteria in surf zone off Huntington Beach, CA. *Marine Environm. Res.* 61:471-493.
25. SOLOMON, C.T.; CARPENTER, S.R.; CLAYTON, M.K.; COLE, J.J.; COLOSO, J.J.; PACE, M.L.; ZANDEN, M.J.; WEIDEL, B.C. 2011. Terrestrial, benthic, and pelagic resource use in lakes: results from a three-isotope Bayesian mixing model. *Ecology.* 92(5):1115-1125.
26. SHIBATA, T.; SOLO-GABRIELE, H.; FLEMING, L.; ELMIR, S. 2004. Monitoring marine recreational water quality using multiple microbial indicators in an urban tropical environment. *Water Res.* 23:3119-3131.
27. SULLIVAN, T.; SNYDER, K.; GILBERT, E.; BISCHOFF, J.M.; WUSTENBERG, M.; MOORE, J.; MOORE, D. 2005. Assessment of Water Quality in Association with Land Use in the Tillamook Bay Watershed, Oregon, USA. *Water, Air Soil Pollut.* 161:3-23.
28. VELÁSQUEZ R, J.O; JIMÉNEZ G., G.J.; SEPULVEDA L., M. 2007. Determinación de la calidad ambiental de la Ciénaga de Colombia. *Gestión y Ambiente.* 10(1):187-200.

Recibido: Agosto 27 de 2010

Aceptado: Noviembre 1 de 2011

# OXIDACIÓN DE N-HEPTANO MEDIADA POR EL COMPUESTO DE COORDINACIÓN $[\text{Mn}(\text{C}_{16}\text{H}_{14}\text{N}_2\text{O}_2)\text{AcO}]$

## N-HEPTANE OXIDATION MEDIATED BY THE COORDINATION COMPOUND $[\text{Mn}(\text{C}_{16}\text{H}_{14}\text{N}_2\text{O}_2)\text{AcO}]$

Camilo Javier Viasus <sup>1</sup>, Raúl Alberto Riveros <sup>2</sup>, John Alexander Alzate <sup>3</sup>, Ana Esperanza Burgos <sup>4</sup>

<sup>1</sup>M.Sc. Química, Químico, Profesor Instructor; Grupo de Investigación en Compuestos de Coordinación y Catálisis – GIBC, Facultad de Ciencia y Tecnología, Universidad de Ciencias Aplicadas y Ambientales, U.D.C.A, Sede Norte, Calle 72 No. 14-20, Bogotá, Colombia. e-mail: caviasus@udca.edu.co. <sup>2</sup>Químico, Universidad Nacional de Colombia, Profesor Catedrático, Universidad de Ciencias Aplicadas y Ambientales U.D.C.A. e-mail: jaalzateca@unal.edu.co. <sup>3</sup>Químico, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia. e-mail: ariverosr@unal.edu.co. <sup>4</sup>Dr. Sc. Química, Profesor Asociado, Laboratorio de Compuestos de Coordinación y Bioinorgánica, Universidad Nacional de Colombia, Carrera 30 No. 45-03, Bogotá. Colombia. e-mail: aeburgosc@unal.edu.co.

Rev. U.D.C.A Act. & Div. Cient. 14(2): 141 - 149, 2011

### RESUMEN

La cantidad de hidrocarburos que son producidos en la actualidad por la industria petrolera continúan en incremento, causando gran contaminación ambiental. La reacción lograda en este trabajo es una alternativa a la recuperación de residuos hidrocarbonados industriales. En este trabajo, se presenta la oxidación de n-heptano, mediada por el compuesto de coordinación  $[\text{Mn}(\text{C}_{16}\text{H}_{14}\text{N}_2\text{O}_2)\text{AcO}]$ . Los productos más significativos de la reacción fueron alcoholes (n-butanol) y cetonas de siete carbonos (2-heptanona, 3-heptanona y 4-heptanona, principalmente). La oxidación de n-heptano se ve favorecida hacia la formación de n-butanol, en medio acuoso y, a la formación de cetonas, en medio no acuoso. Los productos de la oxidación fueron identificados mediante CG-EM.

Palabras clave: Oxidación, hidrocarburos,  $[\text{Mn}(\text{salen})\text{AcO}]$ , recuperación de residuos.

### SUMMARY

The amounts of hydrocarbons that are produced today by the oil industry continue to increase causing great environmental pollution. The reaction present here is an alternative to waste hydrocarbons recovery. In this work it present the n-heptane oxidation mediated by the coordination compound  $[\text{Mn}(\text{C}_{16}\text{H}_{14}\text{N}_2\text{O}_2)\text{AcO}]$ . The most significant reaction products were alcohol (n-butanol) and seven carbons ketones (mainly 2-heptanone, 3-heptanone and 4-heptanone). The n-heptane oxidation is favored toward the formation to n-butanol in aqueous medium and ketone

formation in solvent without water. The oxidation products were identified by GC-MS

Key words: Oxidation, hydrocarbons,  $[\text{Mn}(\text{salen})\text{AcO}]$ , waste recovery.

### INTRODUCCIÓN

La oxidación de hidrocarburos, mediante la activación del enlace CH para obtener compuestos diferentes a los convencionales, como  $\text{CO}_2$ , consiste en la preservación, la reutilización y la buena disposición de compuestos residuales, provenientes de procesos industriales, como petroquímica, gas natural y tratamiento de crudos. Este procedimiento hace que sea valiosa la incorporación de funciones oxigenadas a dichas cadenas (Dyker, 2005; Olah & Molnár, 2003; Shilov & Shul'Pin, 2000).

Robert H. Crabtree, en el 2004, muestra cómo la activación del enlace C-H en alcanos y su funcionalización ha sido muy estudiada y reportada. De manera general, es ampliamente aceptado que la funcionalización de alcanos se puede realizar por dos mecanismos: el primero, completamente organometálico y, el segundo, mediante química de coordinación; en los dos casos, existe una interacción directa con el sustrato por el átomo de carbono o imitando la actividad del citocromo P450 y así poder eliminar las sustancias tóxicas poco polares en el cuerpo humano para hacerlas más polares, solubles en agua y que puedan ser excretadas por la orina (Costas, 2011).

El uso de compuestos de coordinación para realizar oxidaciones, más específicamente epoxidaciones, no es un tema muy novedoso. Los primeros ensayos muestran que los compuestos de coordinación con anillos pirrólicos presentan gran actividad para las epoxidaciones enantioselectivas de alquenos (Jacobsen *et al.* 1994; 1997; Jacobsen, 1995); esta actividad se atribuye a la gran similitud estructural del citocromo C (Reacción (1)) con las metaloporfirinas. Los ensayos realizados muestran que el uso de compuestos de coordinación aceleran las epoxidaciones para la formación de epóxidos y alcoholes, siempre y cuando se realice un tratamiento ácido, posterior a la formación del epóxido (Shahram *et al.* 2010; Costas, 2011).



tabilidad a la transformación de dobles enlaces carbono-carbono y la adición de la funcionalización a lo largo de los dobles enlaces de la estructura (Boaen & Hillmyer, 2003).

Uno de los inconvenientes de las funcionalizaciones es la ausencia de grupos funcionales reactivos; sin embargo, la búsqueda de rutas para funcionalizar materiales, adicionando un valor agregado, continúa, incluyendo las modificaciones parciales que se realizan a pigmentos y otro tipo de macromoléculas, que permiten generar otras propiedades físico-químicas o mejorar las que ya poseen, a través de los nuevos grupos funcionales adicionados (Boaen & Hillmyer, 2003).

La funcionalización de alcanos de bajo peso molecular, mediante la química de coordinación, ha sido bastante explorada, a través de los años, logrando funcionalizar, satisfactoriamente, una gran cantidad de alcanos, por el uso de compuestos porfirinicos y con bases de Schiff unidos a sílice con manganeso(III), como ion central (Valiollah *et al.* 2006) y otros metales, como rutenio(II) (Mehdi *et al.* 2009) y hierro(III) (Sun Chang *et al.* 2011).

Se han aplicado sistemas porfirinicos más complicados, demostrando que la oxidación de n-heptano es posible hacia la formación de alcoholes y de cetonas (Costas, 2011). En este trabajo, se utilizó un sistema simple y diferente a los publicados hasta el momento: el compuesto de coordinación [Mn(Salen)AcO] (Salen = N,N'-bis-salicilaldehidoetilendiamin, C<sub>16</sub>H<sub>14</sub>N<sub>2</sub>O<sub>2</sub>). Con este complejo de coordinación, se analiza la posibilidad de realizar la activación de enlaces C-H de alcanos lineales y ramificados de bajo peso molecular, como base para la recuperación de residuos hidrocarbonados.

La oxidación de los hidrocarburos insaturados y saturados cíclicos ocurre a bajas temperaturas en presencia de oxidantes, como PhIO y H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> (Palucki *et al.* 1992; 1995), utilizando compuestos de coordinación simples, tales como [Mn(salen)] y sus derivados.

La modificación química de hidrocarburos parte de la alteración de polímeros, siendo un método de gran importancia para la preparación de nuevos materiales con diversas propiedades; por ejemplo, en la modificación post-polimerización de poli-dienos, se han utilizado reacciones, como hidrogenación, epoxidación, clorosilación, hidroboración y adiciones de carbenos. Estas reacciones aportan gran es-

## MATERIALES Y MÉTODOS

**Preparación del ligante Salen:** El ligante salen se sintetizó, mezclando salicilaldehído y etilendiamina, en relación molar 2:1, en 20 mL de acetonitrilo seco y bajo reflujo, durante dos horas. Al enfriar el sistema a temperatura ambiente fueron obtenidos cristales amarillos brillantes, filtrados y secados al vacío, durante 24 horas (Shahram *et al.* 2010; Pecoraro & Butler, 1986). El sólido obtenido se caracterizó, mediante las técnicas espectroscópicas UV-vis, FT-IR, <sup>1</sup>H RMN y DEPT 135. El rendimiento de la reacción fue del 97,6%.

**Preparación del compuesto [Mn(salen)AcO]:** El compuesto de coordinación [Mn(C<sub>16</sub>H<sub>14</sub>N<sub>2</sub>O<sub>2</sub>)AcO] fue sintetizado, mezclando el ligante salen con acetato de manganeso(II) anhidro, en 15mL acetonitrilo seco, en relación molar 1:1. La mezcla fue puesta en reflujo durante dos horas (Shahram *et al.* 2010; Pecoraro & Butler, 1986). Se obtuvo un sólido amarillo oscuro, secado al vacío, durante 24 horas e identificado mediante las técnicas espectroscópicas UV-Vis y FT-IR. El rendimiento de la reacción fue del 87,3%. Las reacciones de la preparación del ligante salen y el compuesto [Mn(salen)AcO], se presentan en la figura 1.

**Oxidación de n-heptano:** La reacción de oxidación de n-heptano, se realizó de acuerdo con el procedimiento reportado por Boaen & Hillmyer (2003), en cuanto a los reactivos y a las cantidades molares, pero en este trabajo, se utilizó el compuesto de coordinación [Mn(C<sub>16</sub>H<sub>14</sub>N<sub>2</sub>O<sub>2</sub>)AcO], como catalizador. La reacción de oxidación, se efectuó en acetonitrilo y CH<sub>2</sub>Cl<sub>2</sub>, como disolventes; NaIO<sub>4</sub>, como agente oxi-

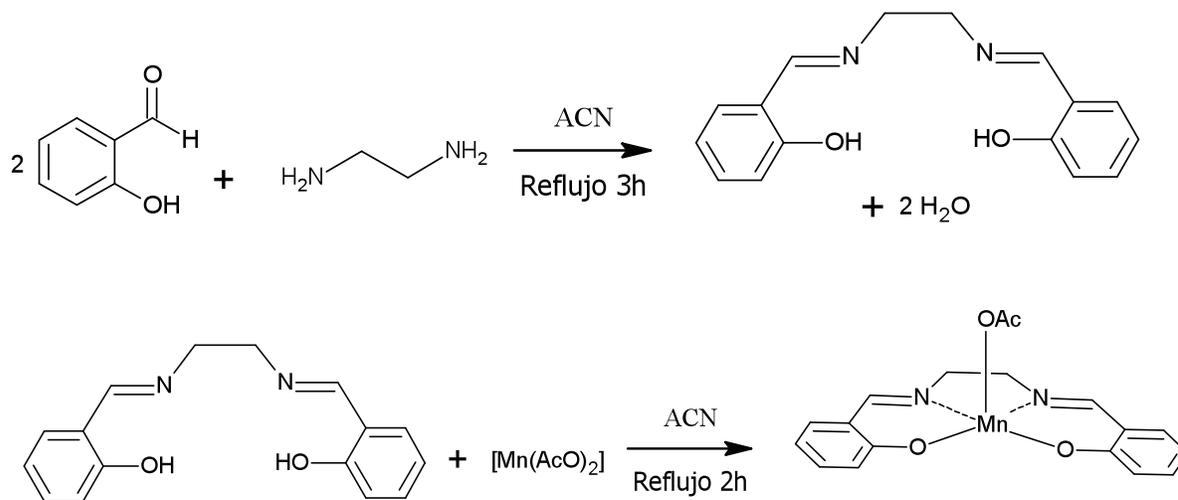


Figura 1. Reacción para la obtención del ligante salen (1) y de la obtención del complejo  $[Mn(C_{16}H_{14}N_2O_2)AcO]$  (2) en acetonitrilo, respectivamente.

dante; imidazol, para incrementar la densidad electrónica sobre el centro metálico, BDTAC (cloruro de bencildimetil-tetradecilamonio), como agente de transferencia de fase y se suprimió el medio acuoso, para evitar la descomposición del compuesto de coordinación; la reacción, se llevó a cabo en un recipiente tipo Parr®, cerrado herméticamente, a 60°C en autoclave, durante cuatro horas. Los compuestos obtenidos de la reacción de oxidación de n-heptano fueron caracterizados, mediante CG-EM (reacción 2).

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El ligante salen se identificó mediante espectroscopia FT-IR (Figura 2), que registra la vibración más importante, que es la formación del doble enlace de la imina, a  $1627\text{cm}^{-1}$ . Así mismo, se presentan las vibraciones para  $-CH_2-$ , a  $2924\text{cm}^{-1}$  y  $C=C$  aromático, a  $1496$  y  $1458\text{cm}^{-1}$ , entre otras. El espectro de  $^1\text{H-NMR}$ , para el ligante salen, se muestra en la figura 3a. Los

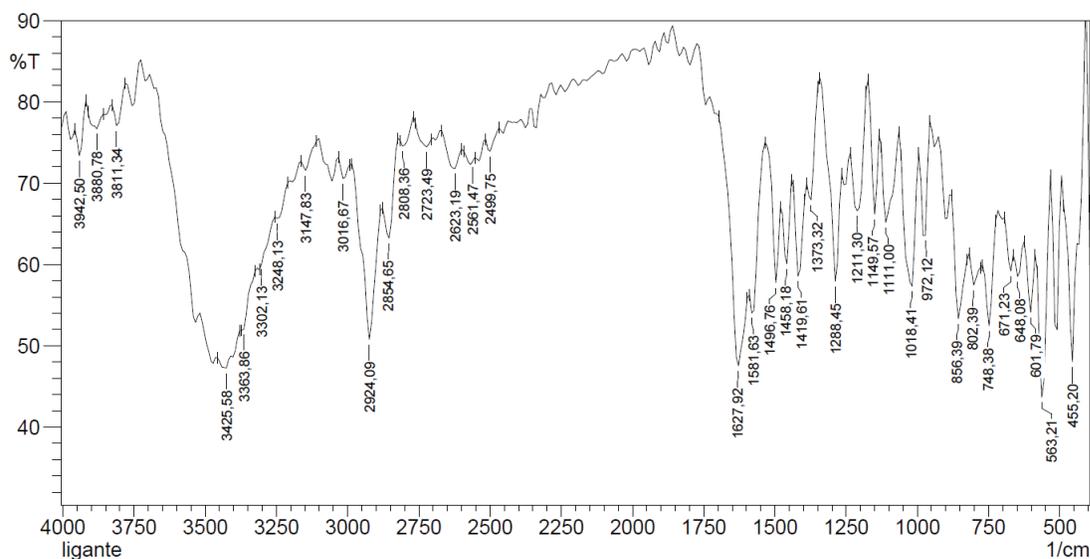
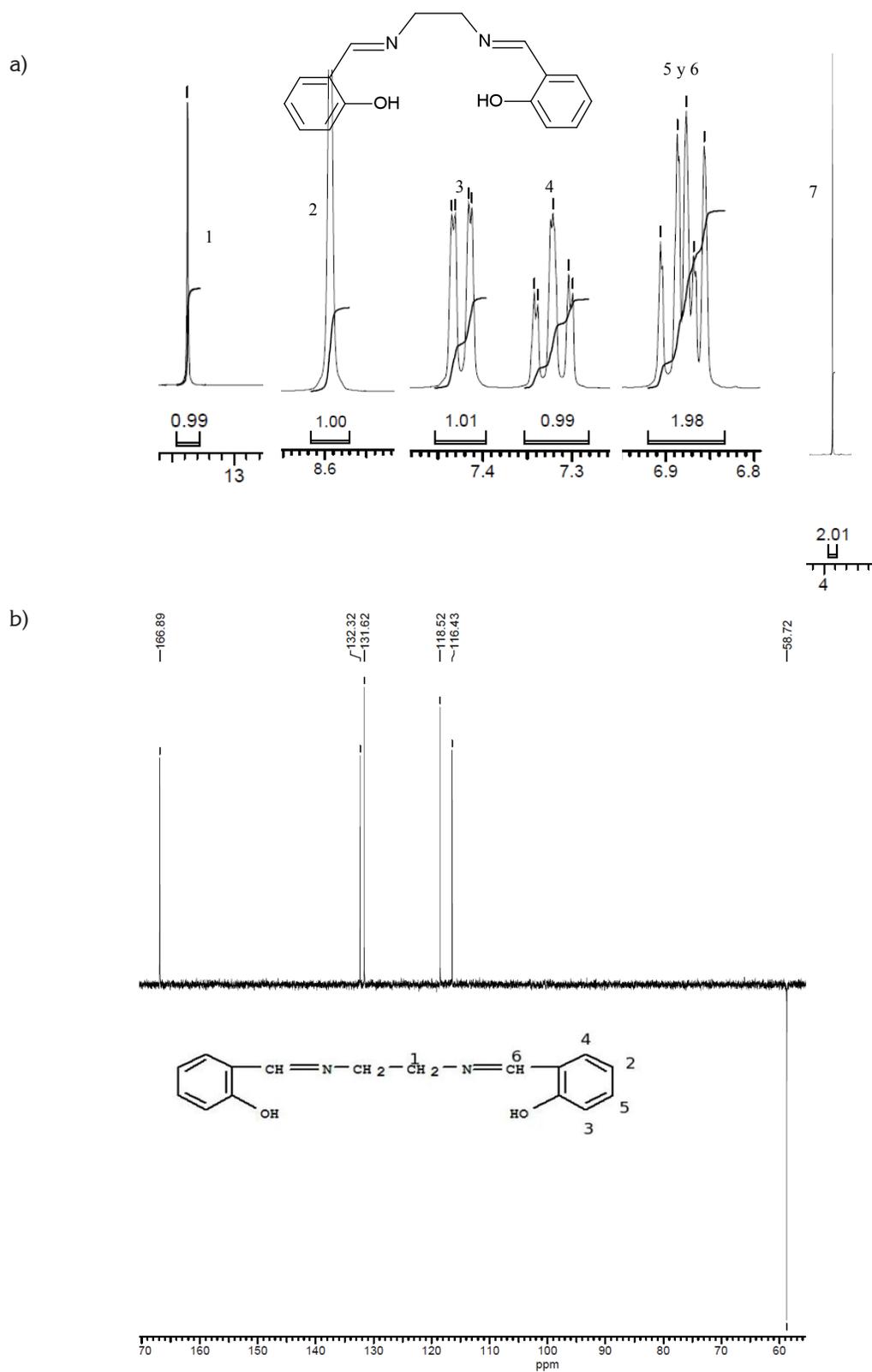


Figura 2. Espectro IR para el ligante salen.



desplazamientos químicos  $\delta$  1570MHz, que integra para dos protones (-CH<sub>2</sub>-), en 2743 y 2763MHz, presenta un doblete y un triplete superpuestos, que corresponden a la integración de los dos protones 5 y 6 C-H aromático; un triplete en 2929MHz, asignado a la posición 4; un doblete en 2973MHz, designado a la posición 3; un singlete en 3438MHz, estipulado a =CH de la imina, posición 2 y, finalmente un singlete en 5352MHz, asignado para el hidrógeno en la posición 1. Estas últimas cuatro posiciones integran, por un protón, cada una, para un total de 8 protones; por la simetría de la molécula, el total son 16 protones. Estas mismas posiciones, se utilizaron para identificar el espectro DEPT135.

El espectro DEPT135 (Figura 3b) para el ligante salen presenta un desplazamiento en 58,72ppm, se asigna a -

CH<sub>2</sub>-, posición 7; el desplazamiento en 116,43, 118,52, 131,62 y 132,32ppm, se asignan a las posiciones 2, 3, 4 y 5, respectivamente y, finalmente, el desplazamiento en 166,89ppm, asignado a =CH de la imina. Los espectros UV-vis para el ligante salen y para el compuesto de coordinación [Mn(Salen)AcO], se presentan en la figura 4, donde el efecto hipsocrómico de la coordinación del ion metálico con el ligante salen, se hace evidente. La tabla 1 registra las máximas absorciones para el ligante y para el [Mn(C<sub>16</sub>H<sub>14</sub>N<sub>2</sub>O<sub>2</sub>)AcO].

El compuesto de coordinación, se identificó mediante espectroscopia UV-vis e IR. El corrimiento en la vibración del enlace C=N a 1635cm<sup>-1</sup> que indica la formación del enlace Mn-N junto a las vibraciones en 455 y 425cm<sup>-1</sup>, corresponde al enlace Mn-O y Mn-N.

Tabla 1. Máximos de absorción para el ligante salen y para el complejo [Mn(salen)AcO].

Salen	Longitud de onda	[Mn(salen)AcO]	Longitud de onda
	215		210
255	240		
320	310		
405	395 a 400		

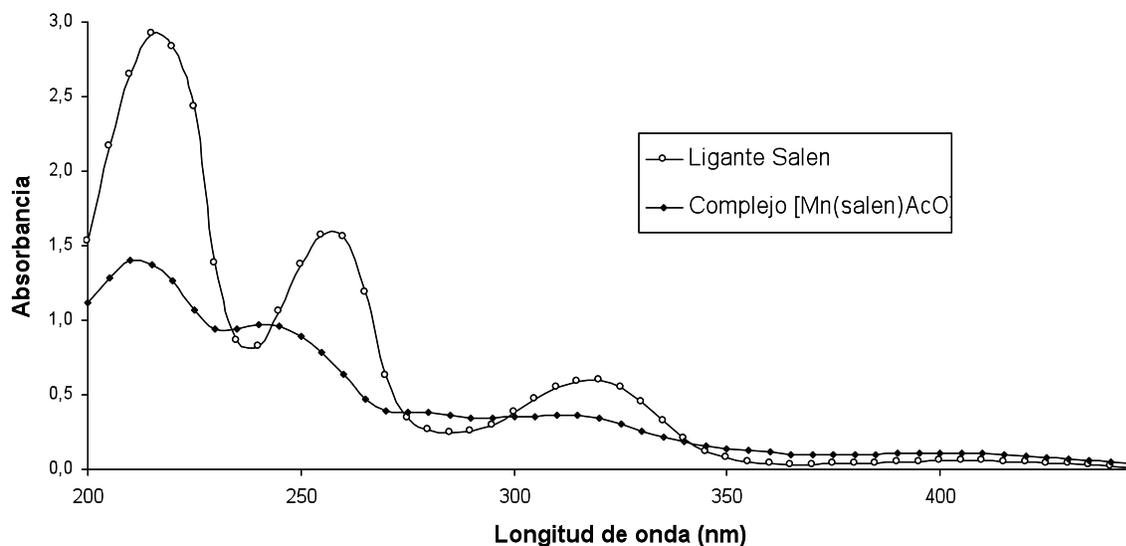
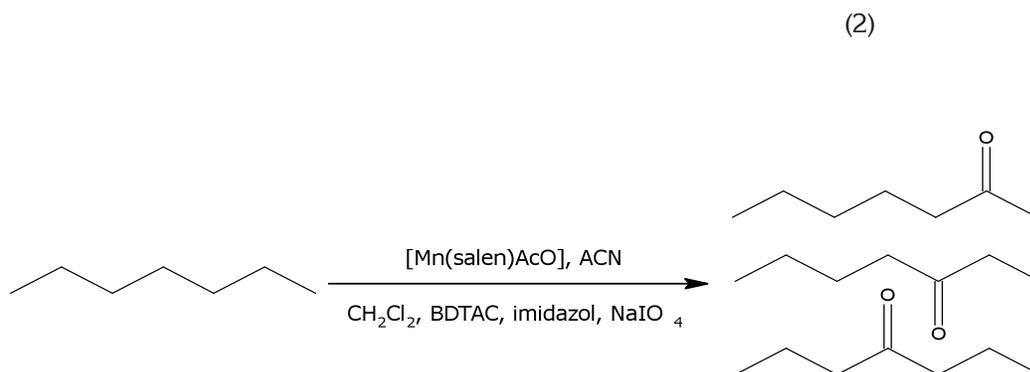


Figura 4. Espectro UV-vis del ligante Salen y del compuesto de coordinación [Mn(salen)AcO] en ACN.

La oxidación de n-heptano, se realiza de acuerdo a la reacción (2).



El medio de reacción resultó ser selectivo a la formación de cetonas de siete carbonos con bajos rendimientos. En publicaciones presentadas con anterioridad, se obtienen no solamente cetonas, también sus respectivos alcoholes, pero en cantidades menores (Valiollah *et. al.* 2006) y para sistemas más complejos. Hay que tener en cuenta que los sistemas presentados en literatura, anteriores a este trabajo, han utilizado como sustratos compuestos que, de alguna manera, no presentan linealidad en la cadena hidrocarbonada saturada, es decir, normalmente son complejos cíclicos saturados o sustituidos (Palucki *et. al.* 1992; 1995). La espectrometría de masas mostró que los compuestos principales obtenidos durante la oxidación de n-heptano aplicando el compuesto de coordinación sintetizado son 2-heptanona, 3-heptanona y 4 heptanona.

Aunque los compuestos obtenidos principalmente fueron cetonas, se presentaron trazas de compuestos menos oxidados, como 2-heptanol y 3-heptanol (Figura 5d y 5e). El resultado de la oxidación completa, se debe al agente donador de oxígenos presente en la reacción, como el  $\text{NaIO}_4$ , así este sistema propuesto para la oxidación de n-heptano resulta ser útil y más sencillo de elaborar que el realizado por Costas (2011), para la oxidación del mismo sustrato.

Debido a que los pesos moleculares son los mismos para cada una de las cetonas presentes, en los rompimientos se evidencia la presencia de cada uno de los compuestos mencionados; para los tres casos, el pico de ion molecular fue de 114m/z ( $\text{C}_7\text{H}_{14}\text{O}^+$ ). Para el compuesto 4-heptanona, se presenta una pérdida de 43 m/z, correspondiente a  $+\text{CH}_2\text{CH}_2\text{CH}_3$ , seguida por una pérdida de 28 m/z, correspondiente a CO; el pico padre se encuentra en 71m/z, que corresponde a  $\text{C}_3\text{H}_7\text{CO}^+$ . Para el compuesto 3-heptanona, se muestra una pérdida inicial de 29 m/z, correspondiente a  $\text{CH}_2\text{CH}_3$  y con pico padre de 54 m/z, correspondiente a  $\text{CH}_3\text{CH}_2\text{CO}^+$ . Para el compuesto 2-heptanona, se presenta

una pérdida de 43m/z, correspondientes a  $\text{COCH}_3$ , seguido por una pérdida de 13m/z, que corresponde a CH, luego una pérdida de 15m/z, correspondiente a  $\text{CH}_3$  y con pico padre de 43m/z, correspondiente a  $\text{CH}_3\text{CO}^+$ . Los espectros de masas para 2-heptanona, 3-heptanona y 4-heptanona, se indican en las figuras 5a, 5b y 5c, respectivamente.

Se encontró que al utilizar agua en el medio de reacción, en lugar de ACN, favorece la formación de n-butanol (Figura 5f) y promueve la descomposición de  $[\text{Mn}(\text{salen})\text{AcO}]$ .

La conversión total del hidrocarburo utilizado fue del 19%, aproximadamente, en cuatro horas de reacción, en donde se encuentran las cetonas de siete carbonos, alcoholes y la transformación de n-heptano a isómeros, como 2-metilhexano, 3-metilhexano, metilciclohexano y etilciclohexano. Esta última reacción de isomerización, para los compuestos de siete carbonos, ocurre sin la presencia del catalizador, utilizado en este trabajo, pero al usar el catalizador, la reacción se hace selectiva a la isomerización a metilciclohexano. De aquí la importancia en el uso del catalizador en la transformación de hidrocarburos saturados de cadena lineal.

Se propone la utilización de este tipo de sistemas con manganeso(III) para la transformación de hidrocarburos de bajo peso molecular, que se obtienen como residuos en las empresas petroleras. Así, se puede dar un valor agregado a los residuos para poder reutilizarlos en diferentes aplicaciones industriales, lo que generaría, sin lugar a dudas, un menor impacto ambiental.

En conclusión, se sintetizó e identificó un sistema sencillo como el compuesto de coordinación  $[\text{Mn}(\text{Salen})\text{AcO}]$ , que resultó ser útil para obtener cetonas, a partir de n-heptano. Aunque los resultados logrados en cuanto a la obtención de compuestos oxidados provenientes de hidrocarburos

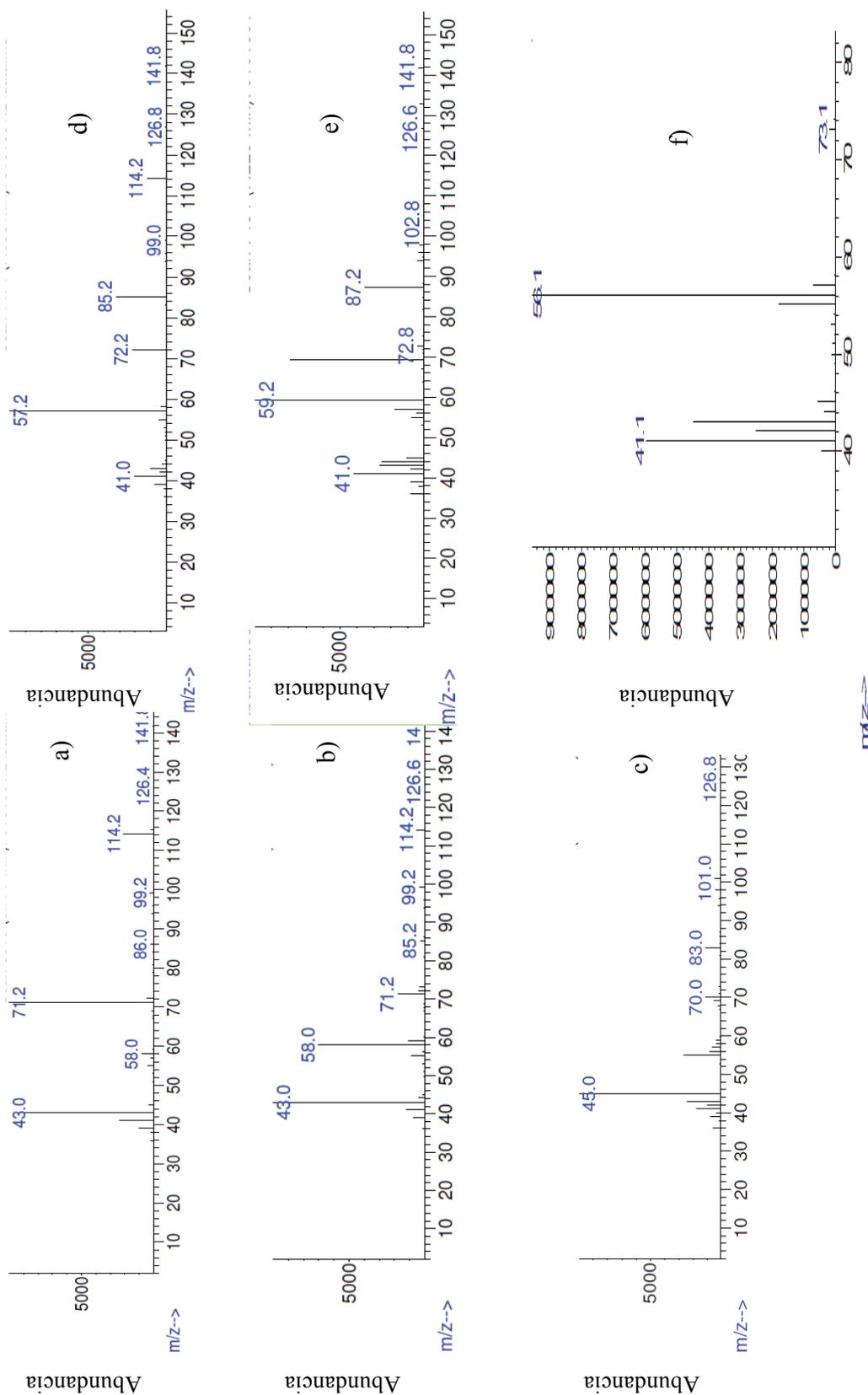


Figura 5. Espectrometría de masas de 2-heptanona(a), 3-heptanona (b), 4-heptanona (c), 2-heptanol (d), 3-heptanol(e) y 1-butanol (f).

lineales, ya sean alcoholes o cetonas, son inferiores en rendimiento, comparado con el trabajo realizado por Costas (2011). Es cierto que el sistema aquí trabajado es más sencillo y las aplicaciones a la fecha que se han reportado para este tipo de compuestos de coordinación, se limitaba únicamente a la epoxidación de alquenos y a oxidaciones en hidrocarburos cíclicos que son más reactivos que los lineales (Jacobsen, 1995; Jacobsen *et al.* 1994) y en sistemas a bajas temperaturas (Palucki *et al.* 1995). Este sistema, se puede emplear en la transformación de hidrocarburos de bajo peso molecular para el mismo fin, lo que reduciría el impacto ambiental que produce normalmente la liberación de estos desechos.

**Agradecimientos:** Al laboratorio de Macromoléculas, por la toma de los espectros IR. Al laboratorio de Compuestos de Coordinación y Bioinorgánica en la Universidad Nacional de Colombia, Sede Bogotá. A Cheyron Castellanos, por el apoyo brindado en el desarrollo de este proyecto. **Conflicto de intereses:** Este escrito fue preparado y revisado con la participación de todos los autores, quienes declaramos que no existe ningún conflicto de intereses que ponga en riesgo la validez de los resultados presentados. **Financiación:** Este estudio fue financiado por la Universidad de Ciencias Aplicadas y Ambientales U.D.C.A, Vicerrectoría de Investigaciones.

## BIBLIOGRAFÍA

- BOAEN, N.K.; HILLMYER, M.A. 2003. Selective and mild oxyfunctionalization of model polyolefins. *Macromolecules*, 36(19):7027-7034.
- COSTAS, M. 2011. Selective C-H oxidation catalyzed by metalloporphyrins. *Chem Coord. Rev.* In press. Disponible desde Internet en: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0010854511001780>(con acceso 06/07/11).
- CRABTREE, R.H. 2004. Organometallic alkane CH activation. *J. Organometallic Chem.* 689:4083-4091.
- DYKER, G. 2005. Handbook of C-H transformation, Wiley-VCH, Weinheim: p.11-24 y 497-524.
- JACOBSEN, E.N.; KAKIUCHI, F.; KONSLEK, R.G.; LARROW, J.F.; TOKUNAGA, M. 1997. Enantioselective catalytic ring opening of epoxides with carboxylic acids. *Tetrahedron Letters*. 38(5):773-776.
- JACOBSEN, E.N. 1995. Transition metal-catalyzed oxidations: asymmetric epoxidation. En: Edward, W.A.; Stone, F.G.A; Geoffrey, W. (eds). *Comprehensive organometallic chemistry II*. Oxford, Elsevier.p. 1097-1135.
- JACOBSEN, E.N.; DENG, L.; FURUKAWA, Y.; MARTÍNEZ, L.E. 1994. Enantioselective catalytic epoxidation of cinnamate esters. *Tetrahedron*, 50(15):4323-4334.
- MEHDI, H.; MAJID, M.; IRAN, S.; VALIOLLAH, M.; SHAHRAM, T.; IRAJ, M.; HADI, K. 2009. Ru(salophen)Cl supported on polystyrene-bound imidazole: an efficient and robust heterogeneous catalyst for epoxidation of alkenes with sodium periodate. *Applied Catalysis A: General*. 370: 66-71.
- OLAH, G.A.; MOLNÁR, Á. 2003. *Hydrocarbon chemistry*, 2nd ed., Wiley, New York. P.427-529.
- PALUCKI, M.; HANSON, P.; JACOBSEN, E.N. 1992. Asymmetric oxidation of sulfides with H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> catalyzed by Mn(III)(Salen) complexes. *Tetrahedron Letters*. 33(47):7111-7114.
- PALUCKI, M.; McCORMICK, G.J.; JACOBSEN, E.N. 1995. Low temperature asymmetric epoxidation of unfunctionalized olefins catalyzed by Mn(III)(salen) complexes. *Tetrahedron Letters*. 36(31):5457-5460.
- PECORARO, V.L.; BUTLER, W.M. 1986. Structure of N,N'-ethylenebis(salicylideneiminato)manganese(III) chloride acetonitrile solvate. *Acta Crystallography*. C42:1151-1154.
- SHAHRAM, T.; MOGHADAM, M.; MIRKHANI, V.; MOHAMMADPOOR-BALTORK, I.; SAEEDI, M.S. 2010. Efficient epoxidation of alkenes with sodium periodate catalyzed by reusable manganese(III) salophen supported on multi-wall carbon nanotubes. *Applied Catalysis A: General*. 381:233-241.
- SHILOV, A.E.; SHULPIN, G.B. 2000. Activation and catalytic reactions of saturated hydrocarbons in the presence of metal complexes. Springer-Verlag, Boston. p.8-19 y 127-187.
- SUN, C-L.; LI, B.J.; SHI, Z-J. 2011. Direct C-H Transformation via Iron Catalysis. *Chemical. Review*. 111(3): 1293-314.

16. VALIOLLAH, M.; MAJID, M.; SHAHRAM, T.; BAHRAM, B. 2006. Silica-bound imidazole as a heterogeneous axial ligand for Mn(salophen)Cl: efficient, recoverable and recyclable catalyst for epoxidation of alkenes and hydroxylation of alkanes with sodium periodate. *Applied Catalysis A: General*, 313:122-129.

Recibido: Septiembre 7 de 2011

Aprobado: Noviembre 6 de 2011

# ABSORCIÓN POR OZONO Y DISPERSIÓN POR AIRE DE LA RADIACIÓN SOLAR ULTRAVIOLETA B

## OZONE ABSORPTION AND PURE AIR SCATTERING OF SOLAR ULTRAVIOLETA B RADIATION

Julio César González Navarrete<sup>1</sup>, Julián Salamanca<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Magister en Ciencias-Física. Dirección de Investigación, Fundación Universitaria Los Libertadores. Correo Electrónico: jucegonza3@hotmail.com. <sup>2</sup> Ph.D. en Física Aplicada. Dirección de Investigación, Fundación Universitaria Los Libertadores. Correo Electrónico: jusalama@gmail.com.

Rev. U.D.C.A Act. & Div. Cient. 14(2): 151 - 159, 2011

### RESUMEN

Para los casos eventuales de falta de información experimental, se presenta una alternativa para poder disponer de datos confiables y validables de los coeficientes de absorción por ozono y de dispersión por aire puro de la radiación solar ultravioleta B (radiación UV-B); dichos coeficientes son requeridos para la estimación de la columna total de ozono al aplicar la espectrofotometría Dobson. La alternativa propuesta tiene que ver con el uso cuidadoso de interpolación, aplicada a series de datos, debidamente validados. Se plantea un ensayo de validación indirecta aplicando la metodología Dobson a la información obtenida de esta manera y así determinar el ozono total.

Palabras clave: Radiómetros, ozono, radiación solar, radiación ultravioleta, absorción, dispersión.

### SUMMARY

For eventual cases of lack of experimental data, an alternative in order to have reliable and verifiable results for both ozone absorption and pure air dispersion coefficients of solar ultraviolet B radiation (UV-B) is shown; these coefficients are required to estimate ozone total column in Dobson spectrophotometry. The proposed alternative has to do with the careful use of interpolation applied to sets of properly validated data. We present an indirect validation test using Dobson methodology to the information obtained in this manner and thus determine the total ozone.

Key words: Radiometer, ozone, solar radiation, ultraviolet radiation, absorption, dispersion.

### INTRODUCCIÓN

La radiación solar, en su paso por la atmósfera, es sometida a varios fenómenos que atenúan su intensidad de manera espectralmente selectiva. Estos procesos son esencialmente:

- La absorción selectiva, ocasionada por diferentes gases y por el vapor de agua.
- La dispersión molecular o de Rayleigh, también generada por los gases y por el vapor de agua.
- La dispersión y la absorción formada por los aerosoles, denominada turbidez o turbiedad (Iqbal, 1983).

Para el tratamiento matemático simultáneo de estos fenómenos, se asume que se dan las condiciones para aplicar la ley de Beer-Bouguer-Lambert en su forma espectral y para diferentes alturas del Sol, en la forma,

$$I_{n\lambda} = I_{on\lambda} e^{-k_{\lambda} m} \quad (1)$$

con:

$I_{n\lambda}$ , la irradiancia solar directa de longitud de onda;  $\lambda$ , que incide en la superficie terrestre después de atravesar la atmósfera;  $I_{on\lambda}$ , la irradiancia solar extraterrestre con longitud de onda  $\lambda$ ;  $k_{\lambda}$ , el coeficiente de atenuación o extinción de la radiación a la misma longitud de onda y  $m$ , el camino óptico o masa óptica atravesada por la radiación en su camino por la atmósfera.

Cada especie química que se halla en la atmósfera contribuye, de forma característica, en el incremento de la atenuación de la radiación solar. Con el fin de estimar la radiación solar que llega a la superficie, se han desarrollado modelos semiempíricos, que involucran los fenómenos, en los que dichas especies intervienen (Boscá, 1995); en varios

de tales modelos, el exponente de la Ecuación 1, se expresa matemáticamente como:

$$k_{\lambda}m = k_{r\lambda}m_r + k_{o\lambda}m_o + k_{w\lambda}m_w + k_{g\lambda}m_g + k_{a\lambda}m_a \quad (2)$$

En general, se asume que todos los procesos de atenuación de la radiación solar son linealmente independientes para cada longitud de onda (Liou, 2002). Los principales procesos de atenuación están representados por: coeficiente de dispersión de Rayleigh  $k_{r\lambda}$ , que explica la atenuación de radiación, debida a dispersión por partículas de tamaño menor que la longitud de onda de la radiación incidente; coeficiente de absorción de la radiación, debida al ozono  $k_{o\lambda}$ , ocasionada por la presencia de este compuesto en un estrato de la atmósfera; coeficiente de absorción, debida al vapor de agua  $k_{w\lambda}$ , relacionada con la humedad relativa y la temperatura de la superficie; coeficiente de absorción, debida a los gases uniformemente mezclados  $k_{g\lambda}$ , por ejemplo,  $\text{CO}_2$  y  $\text{O}_2$ , cuya razón de mezcla permanece constante hasta, aproximadamente, 90km sobre la superficie terrestre y, finalmente, el coeficiente que muestra los efectos de absorción y de dispersión de los aerosoles  $k_{a\lambda}$ . Es pertinente anotar que cada coeficiente de atenuación debe involucrar, a su vez, la masa óptica correspondiente  $m$ ; que estos coeficientes tienen unidades de inverso de longitud y que la Ecuación 2 excluye los efectos de absorción de contaminantes. Si en la Ecuación 1 los valores de la irradiancia extraterrestre y terrestre y los coeficientes de absorción son conocidos, es posible determinar, por ejemplo, la masa óptica del ozono en columna vertical; sin embargo, no siempre se dispone de los valores experimentales específicos de absorción de la radiación por ozono o de dispersión por el aire, lo cual, representa frecuentemente un escollo para la determinación de la columna total del ozono en las metodologías, cuyo fundamento sea la Ecuación 1.

Dentro del conjunto de las interacciones que ocurren entre la radiación solar ultravioleta (R-UV) y el ozono atmosférico, se destacan las que se presentan en el rango espectral de 300 a 340 nm, que forma parte de la banda Huggins (García, 2009); tales interacciones son aprovechadas para determinar la columna total de ozono, entre otras, por las metodologías espectrofotométricas, particularmente, de Dobson y de Brewer (Staehelin *et al.* 2003), que se fundamentan en la Ecuación 1. En este trabajo, se presentarán y se discutirán algunos criterios relativos al uso de datos obtenidos por interpolación de los coeficientes de absorción espectral de la R-UV, por parte del ozono atmosférico y de la dispersión, por parte de los componentes del aire puro, en el mismo rango espectral de 300 a 340nm; este rango espectral es justamente el recomendado para ser utilizado en las metodologías mencionadas. Los valores de los coeficientes en cuestión, pilar de este trabajo, fueron obtenidos en laboratorios por los

diferentes grupos de investigadores, referenciados a lo largo de este artículo.

La absorción espectral de la radiación, se determina por el coeficiente de absorción que, para el ozono, depende, en gran parte, de la temperatura (Grebenshchikov *et al.* 2007); tal dependencia, se presenta por que la sección transversal de absorción del ozono, que es directamente proporcional al coeficiente de absorción, muestra también dependencia espectral y térmica (Staehelin *et al.* 2003; Bernhard *et al.* 2005b).

La R-UV que no es absorbida por el ozono es susceptible de ser dispersada espectralmente por los componentes atmosféricos y el indicador del nivel de dispersión, se expresa mediante el coeficiente de dispersión (Goody, 1964). Se han reportado mediciones de estos coeficientes en condiciones controladas de laboratorio, utilizando algunos valores espectrales discretos de R-UV, en el rango entre 300 y 340nm (Bernhard *et al.* 2005b; Murad & Tabocchini, 1976); sin embargo, no se dispone de mediciones de dichos coeficientes para todas las longitudes de onda en el rango espectral mencionado y, con mucha frecuencia, se requiere conocer valores específicos.

Este trabajo expone una opción de utilizar los valores experimentales existentes para estimar, con alto grado de seguridad, valores aún no medidos o no reportados; esta opción ha sido empleada por varios investigadores en otros rangos espectrales (Iqbal, 1983).

El interés de este trabajo radica, esencialmente, en que dentro del rango UV-B la absorción de la radiación por parte del ozono decae, abruptamente, a medida que aumenta la longitud de onda; esta situación sugiere, el empleo de absorción diferencial de la radiación entre pares de longitudes de onda, lo cual, desde los puntos de vista físico y matemático, es aprovechado para estimar la columna total del ozono estratosférico (Komhyr, 1980; Dobson, 1957). Igualmente, la R-UV que resulta ser sometida a fenómenos dispersivos por parte de los componentes del aire atmosférico (Murad & Tabocchini, 1976), también está involucrada en la determinación del ozono, como factor que disminuye la R-UV directa.

## MATERIALES Y MÉTODOS

La tabla 1 muestra las series de datos reportados por Murad & Tabocchini (1976), Komhyr (1980) y Bernhard *et al.* (2005b), para el coeficiente espectral de absorción del ozono en el rango espectral UV, entre 305,5 y 339,9 nm. Las series de Murad & Tabocchini (1976) (sin asterisco), no reportan análisis de errores ni sus validaciones experimentales respectivas. Los datos mostrados con un asterisco (\*) son los

obtenidos por Komhyr (1980) y validados por observaciones realizadas en el Observatorio de Mauna Loa (Hawaii, USA), para obtener datos del ozono total. La serie de valores reportada por Bernhard *et al.* (2005b), con doble asterisco (\*\*), discrepan de los de Komhyr (1980), en  $\pm 1,2\%$  y fueron calculados asumiendo una temperatura de  $-46,3\text{ }^{\circ}\text{C}$ . A cada una de estas series de datos de los coeficientes espectrales de absorción del ozono, se les aplica un ajuste de funciones matemáticas y se plantea que un valor interpolado debería estar dentro de los respectivos ajustes de esas series de datos. Los datos reportados por son aceptados como los

de la atmósfera estándar por el Climate Monitoring and Diagnostics Laboratory (CMDL). Es importante destacar que el CMDL mantiene un grupo de quince instrumentos Dobson y opera el Centro Mundial Dobson de Calibración del Ozono, bajo los auspicios del programa de Vigilancia Atmosférica Global de la Organización Meteorológica Mundial (OMM). Solamente, se dispone de la serie de datos del coeficiente espectral de dispersión molecular del aire, reportada por Murad & Tabocchini (1976), a la cual, se le hace el respectivo procedimiento.

Tabla 1. Coeficiente de absorción del ozono para longitudes de onda entre 0,3055 mm y 0,3399 mm.

Longitud de onda $\lambda$ ( $\mu\text{m}$ )	Coeficiente de absorción del ozono $k_{\text{O}_3}$ ( $\text{cm}^{-1}$ )	Coeficiente de dispersión molecular de aire puro $k_{\lambda}$ ( $\text{cm}^{-1}$ )
0,3055	1,882; 1,915*; 1,914**	0,491
0,3088 0,3089	1,287; 1,239*; 1,242**	0,470
0,3114 0,3115	0,912; 0,873*; 0,871	0,453
0,3176 0,3175	0,391; 0,384*; 0,387**	0,416
0,3250 0,3254	0,109*; 0,110** 0,120	0,375
0,3291	0,064; 0,062*; 0,063**	0,357
0,3324	0,047; 0,040*; 0,039**	0,343
0,3398 0,3399	0,017; 0,017*; 0,010**	0,312

Con el propósito de tener elementos de juicio para verificar la confiabilidad de valores obtenidos por interpolación de las series de datos experimentales y la pertinencia de su uso para la determinación de la capa de ozono, se debe cuenta algunos criterios mínimos entre los cuales se citan:

Validación de aspectos instrumentales: Los que tienen que ver con la calibración de la respuesta espectral del instrumento y con la función de la apertura o colimación del haz de radiación. Para el caso de las series a tratar en el presente artículo, los autores de las mismas realizaron las correspondientes validaciones (Bernhard *et al.* 2005b), con la metodología estándar aplicable a todos los casos de

calibración de radiómetros UV (Bernhard *et al.* 2005a). La serie de datos del coeficiente de dispersión del aire no serán validados por falta de información experimental adicional; sin embargo, un estudio futuro puede ser validado utilizando los resultados de este trabajo.

Condiciones experimentales: Referidas al entorno, como por ejemplo, la temperatura y la presión ambientales en las que se realizan las mediciones, dentro del cual, se caracterizan, tanto el ozono como el aire. Con la metodología aplicada a los espectrofotómetros Dobson, se observa que la obtención del ozono total está afectada por varios factores de error, relacionados con condiciones ambientales:

- La omisión en las correcciones de la temperatura estratosférica puede conducir a errores de hasta 4%, según Bernhard *et al.* (2005b). Se debe tener en cuenta, además, que las variaciones del perfil vertical del ozono afectan los valores reales del coeficiente espectral de absorción por parte del ozono. En las latitudes altas, las temperaturas estratosféricas están íntimamente ligadas a las variaciones estacionales (Goody, 1964).
- Las aproximaciones en la estimación de la masa de aire generan errores sistemáticos en el cálculo del ozono total (Redondas *et al.* 1996).
- Los errores se incrementan para condiciones de salida y puesta del Sol, ya que según Komhyr (1980), tiende a presentarse un aumento de la radiación espectral difusa, especialmente, en los rangos de bajas longitudes de onda, lo cual, se refleja en una aparente disminución del ozono total. En general, lo anterior también se aplica a grandes ángulos cenitales, es decir, a las regiones en las que el ángulo entre la vertical y la posición del Sol es grande, lo que, básicamente, se presenta en latitudes altas.
- Para disminuir efectos no deseables, como los de bruma, contaminación y nubosidad, se prefiere realizar las mediciones del ozono total en días despejados y libres de contaminación (Redondas *et al.* 1996).

Factores de error: Se evidencia ahora que los anteriores factores tienen menor peso para latitudes ecuatoriales debido a:

- Las temperaturas estratosféricas están menos afectadas por variaciones estacionales (Goody, 1964) y las correcciones requeridas serían mucho menores, por lo cual, valores de absorción del ozono y/o de dispersión del aire, ya sean experimentales o ya obtenidos por interpolación, contribuirán con errores sistemáticos mucho menores a 4%.
- De manera natural, los ángulos cenitales son menores que en las grandes latitudes, lo cual, se hace aún más claro, si se tiene en cuenta que los periodos de medición del ozono total se ubican alrededor del mediodía.
- Aún con las anteriores condiciones favorables es muy importante tener en cuenta que las mediciones del ozono total se deben realizar, preferiblemente, en días despejados (Redondas *et al.* 1996).

Criterios estadísticos: Normalmente aplicados al comportamiento de las series de datos en cuestión, comparados con los estándares referenciales, a través de indicadores que definen rangos de error, desviaciones y/o correlaciones e índices de determinación; en su publicación, Bernhard *et al.* (2005b) contrastan sus cálculos con los resultados experimentales de Komhyr (1980).

Las tres series de datos antes mencionadas son comparadas respecto al coeficiente de absorción del ozono desde el

punto de vista de un ajuste de línea de tendencia en función de la longitud de onda dentro del rango UV-B; luego, desde el mismo punto de vista, se realizará un análisis semejante para la única serie de datos del coeficiente de dispersión del aire puro.

Coeficiente de absorción del ozono en función de la longitud de onda: La información compilada en la tabla 1 muestra las tres series de datos relativas al coeficiente de absorción del ozono en función de la longitud de onda, de las cuales, se muestran sus curvas en la gráfica 1, donde se escogió, como ajuste de línea de tendencia, una función potencial. Cabe anotar que este ajuste fue escogido entre varios ajustes, en el que el coeficiente de correlación de los datos  $R^2$  tomó valores entre 0,995 y 0,998. Se observa que las tres series de datos muestran un comportamiento y una tendencia similares.

Las discrepancias de Bernhard *et al.* (2005b) y la serie de Komhyr (1980) están dentro de un error relativo de  $\pm 1,2\%$  y señalan que los datos obtenidos por interpolación son válidos para ser utilizados en cálculos del ozono total.

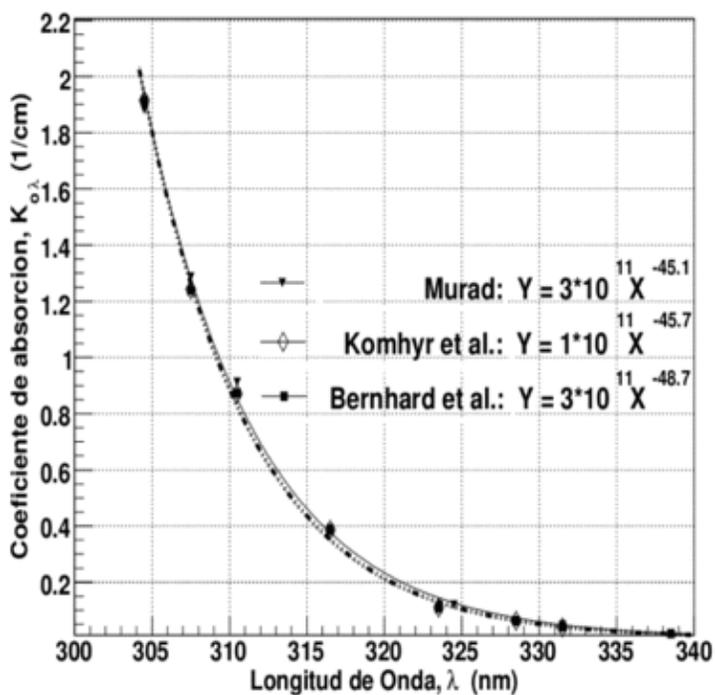
Coeficiente de dispersión molecular del aire puro: Se realiza el ajuste matemático solo para la serie de datos reportados por Murad & Tabocchini (1976) (Tabla 1).

En la gráfica 2, se ilustra el coeficiente de dispersión molecular del aire puro en función de la longitud de onda, para el rango UV-B. En este caso, se obtiene un excelente ajuste a una función polinómica de grado 2 con  $R^2$  de 0,997. Puesto que no hay datos de referencia, se asumirá que una interpolación con esta serie podría arrojar resultados validables.

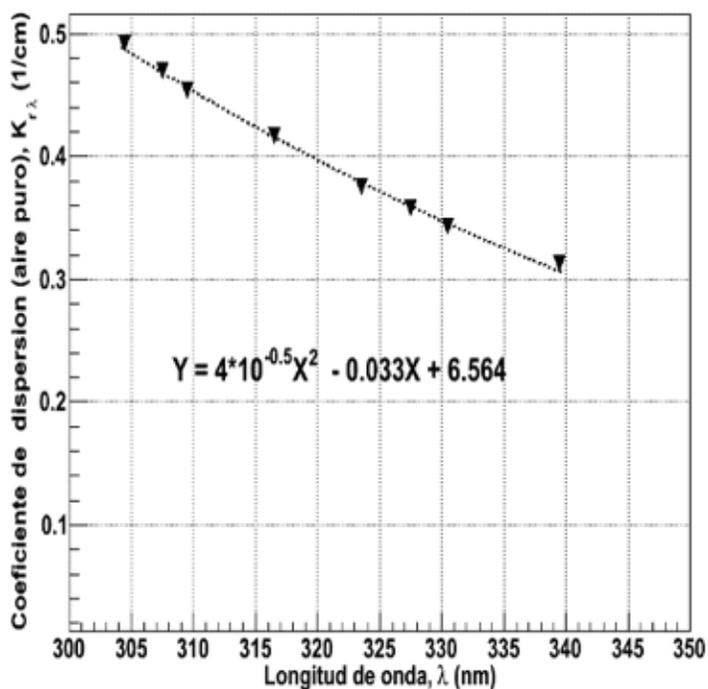
Corresponde a este trabajo acudir a alguna forma de validación de los resultados obtenibles del procedimiento propuesto, ya que las series de datos, base del estudio en este artículo, fueron validadas por los respectivos grupos de investigación en los artículos referenciados.

Una ruta natural de validación es aplicar los resultados obtenidos de los coeficientes de absorción del ozono y de dispersión del aire puro para mediciones de R-UV de longitudes de onda requeridas, en condiciones reales.

La Fundación Universitaria Los Libertadores, con sede en Bogotá, cuenta con un radiómetro ultravioleta GUV2511 de Biospherical Instruments Inc., instalado en el Laboratorio Radiométrico de la misma. Este equipo registra la R-UV espectral global en las longitudes de 305, 313, 320, 340, 380 y 395nm; dentro de este conjunto de longitudes de onda, se desconocen los coeficientes de absorción por ozono y de dispersión por aire de las líneas 313, 320 y 340nm, lo que motiva el interés de aplicar la metodología propuesta, para estos casos específicos. Nótese que las líneas de 380 y 395 nm, se salen del rango de interés en este estudio.



Gráfica 1. Coeficiente de absorción del ozono en función de la longitud de onda en el rango espectral, entre 305 y 340 nm, según las medidas reportadas por Murad & Tabocchini (1976) (triángulo invertido), Komhyr (1980) (rombo) y Bernhard *et al.* (2005b) (cuadrado).



Gráfica 2. Coeficiente de dispersión molecular del aire puro en función de la longitud de onda en el rango espectral, entre 305 y 340nm, según las medidas reportadas por Murad & Tabocchini (1976).

Como procedimiento de validación se recurrirá a una metodología altamente indirecta pero de alguna manera indicadora, ya que se trata de estimar la componente directa de la radiación espectral obtenida de la medición de la radiación global del equipo GUV2511, partiendo del dato del coeficiente de dispersión del aire puro (obtenido por interpolación). Cabe aclarar que el coeficiente se refiere al aire puro, y necesariamente se debe disponer de mediciones de R-UV global para días despejados y libres de contaminación; estas condiciones son bastante difíciles de alcanzar en la ciudad de Bogotá, razón por la cual, se trabaja con los resultados logrados en días semi-despejados, ya que además se enfrentaba el fenómeno de la Niña.

El valor de la radiación solar directa  $I_D(\lambda)$ , se obtiene restando la componente difusa de la radiación global. La radiación difusa,  $I_d(\lambda)$ , se consigue de multiplicar el valor de la R-UV global espectral  $I_G(\lambda)$ , de las longitudes de onda en cuestión, por el valor respectivo del coeficiente de dispersión  $k_{r\lambda}$ . Esto es:

$$I_D(\lambda) = k_{r\lambda} [ I_G(\lambda) ] \tag{3}$$

$$I_D(\lambda) = I_G(\lambda) - k_{r\lambda} [ I_G(\lambda) ] = I_G(\lambda)[1 - k_{r\lambda}] \tag{4}$$

En la tabla 2, se consignan los valores de los coeficientes conseguidos por interpolación para las radiaciones ultravioleta 313, 320, 340nm y los resultados de la estimación

Tabla 2. Valores de los coeficientes obtenidos por interpolación para las radiaciones ultravioleta 313, 320, 340nm y los resultados de la estimación de la radiación directa, para el día 15 de mayo de 2010m entre la 11h30min y las 23h40min.

Longitud de onda $\lambda$ (nm)	Coefficiente de absorción del ozono $(k_{o\lambda})$	Coefficiente de dispersión molecular de aire puro $(k_{r\lambda})$	Radiación global $i_g(\lambda)$ ( $\mu\text{w}/\text{cm}^2\text{nm}$ )	Factor para determinar radiación directa $(1 - k_{r\lambda})$	Radiación directa estimada $i_d(\lambda)$ ( $\mu\text{w}/\text{cm}^2\text{nm}$ )
313	0,742	0,439	31,96875	0,561	17,9345
320	0,274	0,41	45,38178	0,59	26,7753
340	0,015	0,3099	73,759843	0,6901	50,9017

de la radiación directa, para el día 15 de mayo de 2010, entre la 11h30min y las 23h40min, día que se clasificó como semi-despejado.

Debido a la restricción experimental para medir la componente directa de la radiación ultravioleta, mediante el GUV511, no es posible realizar una validación inmediata y directa de los datos estimados, por tal motivo, se recurre a un procedimiento indirecto, que consiste en aplicar estos datos en la estimación del ozono total. En consecuencia, el siguiente paso para incluir la validación de los datos estimados del coeficiente de absorción del ozono es llevar estos datos a la metodología de Dobson (Ecuación 5) y determinar el valor de la columna total de ozono; por ejemplo, para el día 15 de mayo de 2010 y comparar el dato obtenido con el valor satelital reportado en NASA (2011).

La metodología Dobson aquí aplicada está descrita en Murad & Tabocchini (1976), la cual, requiere de dos pares de longitudes de onda de R-UV B. Para este estudio, se definen

así: par A, 305nm (onda corta) y 320nm (onda larga); par B, 313nm (onda corta) y 340nm (onda larga). La tabla 3 resume los correspondientes coeficientes y su preparación para aplicarlos en el método de Dobson y determinar el valor de ozono total,  $\Omega$ , calculado así:

$$\Omega = \frac{[\log (I_{o\lambda c} / I_{o\lambda l}) - \log (I_{\lambda c} / I_{\lambda l})]}{[(k_{oc} - k_{ol})m_o] - [(k_{rc} - k_{rl})m_r] / [k_{oc} - k_{ol}]m_o} \tag{5}$$

donde  $I_\lambda$  es la irradiancia solar directa que incide en la superficie después de atravesar la atmósfera;  $I_{o\lambda}$ , la irradiancia solar extraterrestre con longitud de onda  $\lambda$ ; los subíndices c y l, se refieren a onda corta y larga, respectivamente para cada par Dobson;  $m_o$ , la masa óptica relativa de ozono y  $m_r$  es el camino óptico o masa óptica del aire, atravesada por la radiación en su paso por la atmósfera. De acuerdo a Robinson (Iqbal, 1983),  $m_o$  se puede calcular de:

$$m_o = (1 + z_3/r_e) / [\cos^2\theta_z + 2(z_3/r_e)]^{1/2} \tag{6}$$

con  $z_3$ , la altura sobre el nivel del mar del sitio de medición;  $r_e$ , el radio medio de la Tierra y  $\theta_z$ , el ángulo cenital correspondiente al sitio y la hora de la medición;  $m_p$ , según Kasten & Young (1989), se puede calcular así:

$$m_p = [ \text{Cos}\theta_z + 0.50572 ( 96.07995 - \theta_z )^{-1.6364} ]^{-1} \quad (7)$$

Puesto que la irradiancia solar extraterrestre varía diariamente según la posición de la Tierra con respecto al Sol, se utiliza el valor de la constante solar espectral (Tabla 4) y se calcula el valor diario mediante procedimientos, como el reportado por Simbaqueva & González (2009).

Tabla 3. Constantes características de interacción atmosférica para cada una de las longitudes de onda que intervienen en los pares del método de Dobson, adoptado para el radiómetro GUV 2511, del Laboratorio Radiométrico de la Fundación Universitaria Los Libertadores.

PAR	Longitudes de onda $\lambda$ (nm)	Coeficientes de absorción		Coeficientes de dispersión		Diferencia coeficientes de absorción $k_{oc} - k_{ol}$	Diferencia coeficientes de absorción $k_{rc} - k_{rl}$
		$k_{oc}$	$k_{ol}$	$k_{rc}$	$k_{rl}$		
A	305 320	1,914*	0,274	0,491	0,41	1,64	0,081
B	313 340	0,742	0,015	0,439	0,3099	0,727	0,1291

Tabla 4. Valores de distancia Tierra-Sol, irradiancias espectrales extraterrestres y longitudes de onda para el cálculo de pares Dobson.

Longitudes de onda $\lambda$ (nm)	Irradiancia Espectral Extraterrestre $I_{sc}$ (Wm <sup>-2</sup> nm <sup>-1</sup> )	Corrección por excentricidad para el día 15-05-2010 (n=135) $I_{sc} (R_o/R)^2 = I_{sc} 0,978$
305	0,595*	0,582
320	0,712	0,696
313	0,686**	0,671
340	0,964***	0,943

Con los valores de la tabla 4, se calculan los pares Dobson, obteniendo para  $\Omega_A = 0.241$  y  $\Omega_B = 0.212$ . Siguiendo el método ilustrado por Murad & Tabocchini (1976), se mezclan los resultados de los pares anteriores en la forma siguiente:

$$\Omega = \frac{(N_A - N_B)}{[(k_{oc} - k_{ol})_A - (k_{oc} - k_{ol})_B] m_o] - [(k_{rc} - k_{rl})_A - (k_{rc} - k_{rl})_B] m_r]}{[(k_{oc} - k_{ol})_A - (k_{oc} - k_{ol})_B] m_o]} \quad (8)$$

siendo  $N_A = [\log (I_{oA} / I_{oAl}) - \log (I_{DA} / I_{DAl})]$ , para los respectivos valores del par A y  $N_B = [\log (I_{oB} / I_{oBl}) - \log (I_{DB} / I_{DBl})]$ , para los valores del par B, obteniendo así un valor total de ozono de 252 UD (Unidades Dobson), para el día 15 de mayo de 2010.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El valor total de ozono de 252 UD encontrado por este estudio para el día 15 de mayo de 2010, contrastado con el reporte de NASA (2011) de 240 UD, arroja una discrepancia de tan solo un 5%. Se aclara que el valor tomado de NASA no reporta incertidumbre experimental y se toma como referente internacional; además, el día 15 de mayo de 2010, en la zona de medición (Sede Bolívar de la Fundación Universitaria Los Libertadores), las condiciones eran de cielo medianamente despejado y que a la hora de la medición, 11h35min, se presenta una situación de alta contaminación. Para esta localidad, Simbaqueva y González (2009) reportan que el coeficiente de turbiedad de Ångström fluctúa a lo largo del día, comenzando en 0,200, a las nueve de la

mañana y aumentando hasta 0,350, a las dos de la tarde; hacia el final de la tarde puede tomar valores aún mayores. Datos adicionales suministrados por la Secretaría Distrital del Ambiente SDA (2009), confirman tal comportamiento en esta localidad. Igualmente, no se disponen datos adicionales de otras variables meteorológicas para el día en mención y, por tanto, es imposible cuantificar el efecto de elementos no deseados en la incertidumbre del valor estimado. De todas formas, el valor estimado en las condiciones descritas debe presentar un sesgo hacia valores mayores que el reportado por NASA.

La vasta amplitud de las investigaciones que se realizan sobre el ozono requiere disponer de todas sus características espectrales; sin embargo, al no disponer de conjuntos completos de mediciones, es razonable recurrir a interpolaciones dentro de series discretas de datos, siempre y cuando éstas cumplan algunos criterios mínimos.

Inicialmente, poseer datos que provengan de mediciones rigurosas y que sean referentes ante la comunidad científica que las avala. Seguidamente, los datos se deben contrastar con las mediciones de otros grupos, en condiciones experimentales similares. Adicionalmente, es importante que los ajustes de línea de tendencia basados en modelos matemáticos y estadísticos muestren altos coeficientes de determinación. Por último, los datos deben soportar diferentes procesos de validación instrumental, física, estadística y matemática.

Respecto al rango espectral específico que refiere este trabajo, se evidencia que ciertas metodologías de medición de ozono, se pueden beneficiar al ampliar el conocimiento del comportamiento del ozono, en cuanto a la absorción de la R-UV B, en particular, cuando se integra la metodología Dobson a instrumentos diferentes a los espectrofotómetros Dobson. El beneficio más importante consiste en que aquellas metodologías que utilizan la radiación UV-B solar global tienen una forma de estimar la R-UV B solar directa a partir de este procedimiento; esto permite hacer investigaciones sobre el comportamiento y el efecto de las nubes y los aerosoles. Debido a la ubicación geográfica y a la gran incidencia de nubes cambiantes en el tiempo, se propone a la Sabana de Bogotá como un importante laboratorio para el estudio de las nubes y sus efectos sobre el ambiente.

**Agradecimientos:** Los autores de este trabajo agradecen a la Fundación Universitaria los Libertadores y, particularmente, a su Dirección de Investigación, por el soporte financiero al proyecto “Valoración de las Condiciones Atmosféricas que Determinan el Riesgo por Exposición a la Radiación Solar Ultravioleta en la Sabana de Bogotá”, proyecto del cual, surge el presente artículo. **Conflictos de intereses:** El trabajo

fue preparado por el primer autor y revisado y avalado por el segundo autor, quienes declaramos que no existe ningún conflicto de intereses que ponga en riesgo la validez de los resultados presentados.

## BIBLIOGRAFÍA

1. BERNHARD, G.; BOOTH, C.R.; EHRAMJIAN, J.C. 2005a. Real-time ultraviolet and column ozone from multichannel ultraviolet radiometers deployed in the National Science Foundation's ultraviolet monitoring network. *Optical Engineering*. 44(4):041011-1-041011-11.
2. BERNHARD, G.; EVANS, R.D.; LABOW, G.J.; OLTMANS, S.J. 2005b. Bias in Dobson total ozone measurements at high latitudes due to approximations in calculations of ozone absorption coefficients and air mass. *J. Geophys. Res.* 110(D10):10.
3. BOSCA, J.V. 1995. Contribución al estudio de la radiación solar y de la determinación de la turbiedad atmosférica. Aplicaciones a Valencia y Sevilla. Tesis doctoral, Universidad Politécnica de Valencia (España). 393p.
4. DOBSON, G.M.B. 1957. Handbook for the Ozone Spectrophotometer Part I. *Ann. Int. Geophys.* 48-89.
5. GARCÍA, R.D. 2009. Análisis de la capacidad de los modelos de transferencia radiativa para la calibración de los radiómetros: aplicación al radiómetro NILU-UV. Nota Técnica Digital No. 4. Centro de Investigación Atmosférica de Izaña (España). 94p.
6. GOODY, R.M. 1964. Atmospheric Radiation. Clarendon Press (Inglaterra). 436p.
7. GREBENSHCHIKOV, S.YU.; QU, Z.-W.; ZHUI, W.H.; SCHINKE, R. 2007. New theoretical investigations of the photodissociation of ozone in the Hartley, Huggins, Chappuis, and Wulf bands. *Phys. Chem. Chem. Phys.* 9:2044-2064.
8. IQBAL, M. 1983. An Introduction to Solar Radiation. Academic press (Canada). 377p.
9. KASTEN, F.; YOUNG, T. 1989. Revised optical air mass tables and approximation formula. *Applied Optics* 28:4735-4738.

10. KOMHYR, W.D. 1980. Operations Handbook - Ozone Observations with a Dobson Spectrophotometer. Prepared for the World Meteorological Organization Global Ozone Research and Monitoring Project. Revised September, 2008 by Robert Evans. NOAA/ESRL Global Monitoring Division. WMO/TD-No. 1469 (Suiza). 93p.
11. LIOU, K.N. 2002. An Introduction to Atmospheric Radiation. 2nd ed. Academic Press, San Diego (USA). 583p.
12. MURAD, A.C.; TABOCCHINI, H.L. 1976. Variaciones del Espesor de la Ozonósfera sobre Buenos Aires y su Relación con las Condiciones Meteorológicas de la Troposfera y la Estratosfera. Fuerza Aérea Argentina, Comando de Regiones Aéreas, Servicio Meteorológico Nacional (Argentina). 48p.
13. NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION (NASA) 2011. Total Ozone Mapping Spectrometer. Disponible desde Internet en: <http://toms.gsfc.nasa.gov/ozone/ozone.html> (con acceso el 25/06/2011).
14. REDONDAS, A.; CUEVAS, E.; SANCHO, J.M. 1996. Investigación y Programa de Medidas del Ozono Estratosférico y la Radiación Ultravioleta en el Observatorio de Vigilancia Atmosférica de Izana (INM). Madrid. Física de la Tierra. 9:29-66.
15. SECRETARÍA DISTRITAL DEL AMBIENTE SDA. 2009. Informe anual de calidad del aire de Bogotá año 2008. Red de Monitoreo de Calidad del Aire de Bogotá D.C. Disponible desde Internet en: <http://www.secretariadeambiente.gov.co/sda/libreria/pdf/InformeAnual/Informe2008.pdf> (con acceso 25/06/2011).
16. SIMBAQUEVA, O.; GONZÁLEZ, J.C. 2009. Un método y programa de cálculo para estimar turbiedad atmosférica sobre la Ciudad de Bogotá, utilizando medidas de radiación solar directa con pirheliómetro Eppley en todo el ancho de banda del espectro solar para días despejados. Proceedings Congremet X, Climet XIII, Buenos Aires, Argentina.
17. STAEHELIN, J.; KERR, J.; EVANS, R.; VANICEK, K. 2003. Comparison of total ozone measurements of Dobson and Brewer spectrophotometers and recommended transfer function. World Meteorological Organization Global Atmosphere Watch WMO TD. 1147:1-35.
18. WORLD CLIMATE RESEARCH PROGRAMME (WCRP) 1986. World Meteorological Organization. Publications Series No. 7. WMO/TD No. 149. 39p.

Recibido: Marzo 22 de 2011

Aceptado: Noviembre 4 de 2011

# PREDICCIÓN DEL PRECIO DE LA ELECTRICIDAD EN BRASIL USANDO REDES CASCADA CORRELACIÓN

## CASCADE CORRELATION NETWORKS FOR ELECTRICITY SPOT PRICE FORECASTING IN BRASIL

Fernán Villa<sup>1</sup>, Juan Velásquez<sup>2</sup>

<sup>1</sup> M.Sc. Escuela de Sistemas. Facultad de Minas. Universidad Nacional de Colombia. e-mail: fernanvilla@gmail.com <sup>2</sup> Ph.D. Escuela de Sistemas. Facultad de Minas. Universidad Nacional de Colombia. Carrera 80 No. 65 – 223. Medellín, Colombia. Autor para Correspondencia. e-mail: jdvelasq@unal.edu.co

Rev. U.D.C.A Act. & Div. Cient. 14(2): 161 - 167, 2011

### RESUMEN

En este artículo, se propone utilizar redes neuronales tipo cascada correlación regularizadas, para pronosticar el precio mensual, de corto plazo, de la electricidad del mercado brasileño. Se estiman diversos modelos de redes cascada correlación regularizados entre la capa de entrada y oculta, con descomposición o con eliminación de pesos, mientras que entre la capa oculta y la de salida, se regulariza con regresión de borde. Los resultados indican que las redes cascada correlación regularizadas en todas sus capas describen mejor la dinámica de la serie de precios que la misma red sin regularizar, que un modelo ARIMA y que un perceptrón multicapa (MLP) clásico, que usa los mismos rezagos y neuronas en la capa oculta, lo cual, permite afirmar, que para la serie de precios de electricidad, las redes cascada correlación regularizadas permiten encontrar modelos con mejor capacidad de pronóstico.

Palabras clave: Pronóstico, redes neuronales, mercados liberalizados.

### ABSTRACT

The aim of this paper is to propose the use of regularized cascade correlation neural networks to forecast the monthly Brazilian electricity spot price. The cascade correlation models have been regularized with weight decay, weight elimination and ridge regression techniques, and several regularized models have been estimated. The results show that the regularized cascade correlation network represents the dynamic series better than other similar models such as the multilayer perceptron (MLP) and ARIMA. Then the regularized cascade correlation neural networks allow finding a suitable model to forecast the monthly Brazilian electricity spot price.

Key words: Forecasting, neural networks, liberalized markets.

### INTRODUCCIÓN

En la literatura, se han propuesto diversas técnicas para realizar la predicción de series de tiempo; de las disponibles, las redes neuronales artificiales (RNA) han mostrado ser más robustas que otras técnicas tradicionales, como ARIMA, especialmente, en la representación de relaciones complejas que exhiben comportamientos no lineales. Según Masters (1993), existen varias razones, por las cuales, se debería utilizar una RNA en vez de alguna técnica tradicional, entre estas, que poseen una amplia capacidad para aprender relaciones desconocidas, a partir de un conjunto de ejemplos; además, tienen una alta tolerancia a patrones extraños de ruido y componentes caóticos presentes en la serie y son suficientemente robustas para procesar información incompleta, inexacta o contaminada.

Una revisión del estado del arte, del pronóstico de series de tiempo con redes neuronales, es presentada por Zhang *et al.* (1998); particularmente, en mercados de electricidad, se han realizado contribuciones importantes, entre ellas: Velásquez *et al.* (2007), analizan las dificultades encontradas por los investigadores y profesionales cuando intentan pronosticar los precios de la electricidad, con el objetivo de contribuir a identificar las barreras más importantes para tal fin; Velásquez *et al.* (2008), usan un modelo conocido como red neuronal autorregresiva, un perceptrón multicapa y un modelo autorregresivo, para pronosticar el precio spot de la electricidad en Brasil, entre enero de 1993 y septiembre de 2003, obteniendo mejores resultados con la red neuronal autorregresiva; Gareta *et al.* (2004), muestran que las redes neuronales son una herramienta adecuada para predecir los precios horarios base de la electricidad del mercado

eléctrico Europeo; Hippert *et al.* (2005), realizan una revisión del estado del arte de la predicción de la carga eléctrica a corto plazo, con redes neuronales.

El modelado y la predicción de precios de la electricidad es un problema particularmente difícil, debido a que el proceso de transformación de los sectores eléctricos en el mundo ha creado nuevos mercados competitivos, diseñados bajo el principio de eficiencia económica, que incentivan la entrada de capitales privados a los negocios de generación, de transmisión y de distribución (Steiner, 2000; Armstrong *et al.* 1994). Con la llegada de la nueva estructura competitiva del mercado, se implementaron nuevos mecanismos para la formación de los precios de la electricidad, obligando al desmonte de todas las protecciones y controles existentes. Es así, entonces, como las series de precios de la electricidad poseen, ahora, características únicas que no han estado presentes en los mercados eléctricos tradicionales. Tal como es indicado por Pilipovic (1998), los precios de la electricidad en los mercados liberalizados –sin regulación–, se ven influenciados en el corto plazo por las condiciones instantáneas de operación del sistema de generación para satisfacer la demanda, mientras que en el largo plazo dependen del crecimiento de la demanda y de la nueva capacidad instalada para atenderla; consecuentemente, la evolución del precio se ve influenciada por una gran cantidad de factores complejos, que se resumen en las condiciones físicas del sistema de generación, en las decisiones de negocio de los agentes y en las decisiones y pautas del regulador.

Así, el modelado y la predicción de los precios de la electricidad ha cobrado una importancia fundamental, para los distintos agentes económicos, ya que está relacionada con:

- La necesidad que tienen los generadores, los distribuidores y el regulador del mercado de tomar decisiones, tanto operativas como estratégicas, relacionadas con la formulación de estrategias de comercialización, en el corto y en el largo plazo (Pilipovic, 1998).
- La optimización de su programa de generación la conformación del portafolio de activos de generación (Conejo *et al.* 2005).
- La adquisición de nuevas plantas y el abandono de plantas existentes (Lu *et al.* 2005; Angelus, 2001).
- Así como un mejor manejo y planeamiento del mercado desde el papel del regulador (Angelus, 2001).

Particularmente, en el caso brasileño, el proceso de reforma creó el Mercado Atacadista de Energía (MAE), donde la electricidad es libremente negociada, a través de contratos forward bilaterales, entre los agentes y una Bolsa de excedentes, donde las compras y las ventas se liquida

directamente con el ente administrador del sistema, a un precio de mercado establecido por el gobierno. El precio *spot* o de corto plazo es usado como una señal económica, que refleja el costo marginal de operación del sistema de generación en el corto plazo. Su modelado y su pronóstico son particularmente difíciles, debido a la complejidad de la dinámica de la serie y la corta información histórica disponible. Adicionalmente, existen pocos trabajos relacionados con su modelado e interpretación (De Medeiros, 2004). En este trabajo, se realiza una contribución, en este aspecto, al modelar la serie de precios de corto plazo de Brasil, con redes Cascada Correlación.

La red neuronal artificial, conocida como Cascada Correlación (CASCOR), diseñada originalmente por Fahlman & Lebiere (1990), presenta ventajas conceptuales muy interesantes, en relación al problema de identificabilidad estadística de los MLP (Velásquez *et al.* 2010). La red CASCOR está proyectada siguiendo el esquema de crecimiento de red o de aprendizaje constructivo; se comienza con una red mínima sin capas ocultas, es decir, con sólo algunas entradas y uno o más nodos de salida; las neuronas ocultas son agregadas, una a una, en la red, obteniendo, de esta manera, una estructura multicapa; en el proceso de adición de neuronas ocultas a la red, cada nueva neurona recibe una conexión sináptica de cada una de las neuronas de entrada y también de las neuronas ocultas que la preceden. Luego de agregar la nueva neurona oculta, los pesos sinápticos de su entrada son congelados, mientras que los pesos de su salida son entrenados repetidamente; este proceso continúa hasta que se alcanza un rendimiento deseado. Consecuentemente, en una red CASCOR no es necesario conocer, *a priori*, la cantidad de neuronas necesarias en la capa oculta, por tanto, el aprendizaje de la red puede ser más rápido y tener mejor capacidad de generalización que un MLP (Villa *et al.* 2008).

A pesar que el aprendizaje de las redes CASCOR es constructivo, pueden adolecer de sobreajuste, tal como en otros tipos de técnicas, debido, básicamente, a dos causas: la primera, está relacionada con el tamaño óptimo de la red y, la segunda, con la existencia de datos extremos (*outliers*) en el conjunto de entrada, esto hace que la varianza de los parámetros de la red sea alta. El sobreajuste es un fenómeno, en el cual, la red no generaliza los datos y sólo puede responder correctamente ante los estímulos ya conocidos, es decir, la red memoriza en vez de aprender; este fenómeno se evidencia cuando se produce un error de entrenamiento muy pequeño y un error de validación muy alto (Villa *et al.* 2008); Consecuentemente, si se presentan una o ambas de las causas mencionadas, el modelo CASCOR podría sobreajustar los datos, lo que puede degradar, ostensiblemente, su capacidad de predicción.

Villa *et al.* (2008) proponen controlar la primera causa, regularizando los pesos de la red CASCOR, entre la capa de entrada y la oculta, empleando las estrategias de descomposición de pesos (Weight Decay) propuesta por Hinton (1989) y eliminación de pesos (Weight Elimination), por Weigend *et al.* (1991), las cuales, han sido ampliamente utilizadas para regularizar los MLP. Asimismo, muestran que las estrategias de regularización permiten encontrar modelos con mejor capacidad de generalización y de habilidad para pronosticar series temporales; sin embargo, no tienen en cuenta la segunda causa de sobreajuste.

La segunda causa de sobreajuste, se puede abordar mediante la regularización de las conexiones entre la capa oculta y la capa de salida, usando la estrategia de regresión de borde (Ridge Regression), propuesta por Hoerl & Kennard (1970); la idea central de esta estrategia es controlar la varianza de los parámetros, buscando el equilibrio entre sesgo y varianza (bias variance trade-off) (para más detalles consultar Hoerl & Kennard, 1970 y Marquardt & Snee, 1975). Esta estrategia de regularización puede reducir la varianza de los pesos y minimizar el efecto de los datos extremos y, consecuentemente, reducir el error en validación; sin embargo, no se ha considerado el uso de dicha estrategia en el entrenamiento de redes CASCOR para modelar series de tiempo de precios de la electricidad, aunque es de esperarse que se puedan obtener modelos con una mejor capacidad de generalización.

Entonces, esta investigación tuvo los siguientes objetivos: implementar la estrategia de regularización de regresión de borde en la especificación de la red CASCOR; además, analizar, empíricamente, el efecto de las estrategias de regularización mencionadas sobre las redes CASCOR, al pronosticar la serie de tiempo del precio mensual de corto plazo, de la electricidad del mercado brasileño y comparar los resultados obtenidos, con los de otros modelos.

Además, mediante este trabajo, se busca contribuir, tanto conceptual como metodológicamente, a la solución de algunos de los problemas de la predicción de series de tiempo de precios de la electricidad (Velásquez *et al.* 2007). En este orden de ideas, el modelado y el pronóstico de series de precios de la electricidad es particularmente difícil, debido a la complejidad de la dinámica de la mayoría de las series y la corta información histórica disponible. Entonces, es necesario emplear técnicas suficientemente robustas para realizar su pronóstico, tal como redes neuronales cascada correlación.

Para alcanzar los objetivos propuestos, el resto del artículo está estructurado como sigue: en la siguiente sección, se describe la información utilizada para realizar el pronóstico

en cuestión; a continuación, la metodología empleada; seguidamente, se presentan y se discuten los resultados obtenidos y, finalmente, se concluye.

## MATERIALES Y MÉTODOS

El precio de corto plazo en Brasil es fijado semanalmente y se calcula para cada uno de los cuatro submercados (Norte-Nordeste, Sureste/Centro, Oeste y Sur) en que se encuentra dividido el sector eléctrico brasileño. Corresponde al costo marginal de demanda, resultante de la optimización de la operación mensual, usando un modelo de planificación centralizada y, posteriormente, una planificación determinística para llevarlo a nivel semanal. No obstante, el precio puede ser modificado si se considera que no refleja, adecuadamente, las condiciones del sistema de generación en el corto plazo.

Los precios son una señal económica relacionada con el costo marginal del mercado, los cuales, permiten a los generadores, la recuperación de sus costos operacionales en el corto plazo y de sus inversiones en el largo plazo; más aún, el crecimiento de los precios señala la necesidad de nuevas inversiones en activos de generación. Es evidente la importancia de los pronósticos de los precios de electricidad, ya que todas las decisiones operativas y estratégicas de los participantes en el mercado son basadas en ellos (Velásquez *et al.* 2008).

De Medeiros (2004), indica que el parque de generación es predominantemente hidráulico, alcanzando, aproximadamente, un 85% de la capacidad instalada del sistema (unos 68 GW), mientras que la capacidad restante es suministrada por plantas térmicas (alrededor de 9 GW), importaciones (2 GW) y pequeñas plantas (1 GW). El sistema tiene un cubrimiento del 97% de la demanda total del sistema; dada la importancia del modelado y la predicción de largo plazo, para las decisiones de los agentes del mercado.

Para realizar el pronóstico, se posee la información histórica del precio entre 1996:1 y 2009:11, en la región SE, para un total de 167 datos. Se transforma la serie, mediante el logaritmo natural; esto impone una restricción estructural de los precios, ya que evita que los valores pronosticados puedan ser negativos; adicionalmente, facilita la labor del modelado, puesto que la distribución de la variable dependiente se hace más semejante a una normal, minimizando la influencia de los valores extremos. En la Figura 1, se presenta el logaritmo natural de precio mensual de corto plazo de la región SE.

El modelado y la predicción de la serie de precio mensual de corto plazo brasileño de la electricidad de la región SE

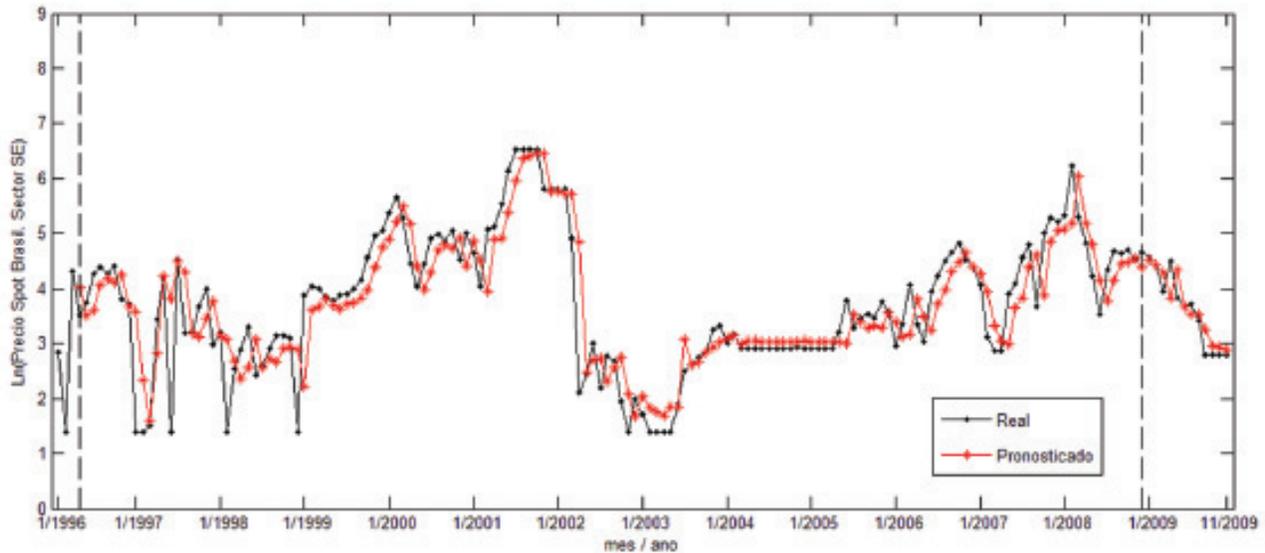


Figura 1. Predicción un paso delante de la Serie de Precios Spot Brasil del Sector SE.

son particularmente difíciles, debido a su dinámica compleja y la corta información histórica disponible. Para estimar los parámetros de los modelos, se toman los primeros 155 datos, los restantes, se emplean para evaluar su capacidad de predicción en un horizonte de doce meses. A continuación, se describe un protocolo de selección para el tipo de red CASCOR, para la predicción de esta serie.

El tamaño inicial de la red CASCOR, se puede especificar de la siguiente manera:

- Las neuronas de la capa de entrada corresponden a cada uno de los rezagos seleccionados a criterio de la persona experta que desea realizar el pronóstico para una serie de tiempo específica.
- Las neuronas en la capa oculta, por el esquema de aprendizaje de las redes CASCOR, su cantidad inicial es cero.
- Para realizar tareas de pronóstico un paso adelante es suficiente con una neurona de salida o de respuesta.
- Para seleccionar la cantidad de neuronas en la capa oculta de la red, el aprendizaje incremental de la arquitectura de las redes CASCOR permite encontrar su cantidad óptima.

A pesar de que la red misma determina su tamaño y su topología, ésta pueden adolecer de sobreajuste; para controlar este problema, se propone regularizar los pesos entre la capa de entrada y la oculta, con las estrategias de descomposición o de eliminación de pesos y los pesos entre

la capa oculta y la de salida, con regresión de borde. En este orden de ideas es posible tener los siguientes esquemas de regularización: sólo regularizar con eliminación de pesos; sólo con descomposición de pesos; sólo con regresión de borde; regularizar completamente la red CASCOR, es decir, regularizar, a la vez, con eliminación de pesos y de regresión de borde o con descomposición de pesos y regresión de borde.

Respecto a la selección de las entradas a la red (rezagos), se controla implícitamente, mediante la estrategia de regularización de eliminación de pesos o descomposición de pesos (Villa *et al.* 2008).

Además, los parámetros de la red CASCOR, se estiman mediante ConRprop, técnica que permite encontrar modelos con mejor capacidad de generalización que los obtenidos con los MLP, optimizados con otras técnicas (Villa *et al.* 2009). Para el entrenamiento de la red, se utiliza el 80% de la información correspondiente a los primeros datos de la serie en su orden y para su validación el 20% restante. Para la regularización por descomposición de pesos, se toma  $\lambda=0,0001$ , mientras que para eliminación de pesos,  $\lambda=0,0001$  y  $w_0=100$  (Villa *et al.* 2008). Finalmente, se usa el logaritmo natural de la serie para estabilizarla en varianza; una vez definida la metodología en la siguiente sección, se presentan y analizan los resultados.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Para la serie estudiada en este artículo, se estimaron los modelos de la Tabla 1, con los cuales, se realizó el pronóstico en un horizonte de un año, es decir, doce meses. La bondad de ajuste de los modelos, se midió con la sumatoria del error cuadrático medio (MSE), tanto en entrenamiento como en pronóstico (validación); los resultados se presentan en la misma tabla. Además, para analizar el efecto de las estrategias de regularización sobre los modelos CASCOR, se usan los siguientes esquemas de regularización:

- (a) EP, red CASCOR regularizada con eliminación de pesos
- (b) DP, red CASCOR regularizada con descomposición de pesos
- (c) RB, red CASCOR regularizada con regresión de borde
- (d) EP+RB, red CASCOR regularizada con eliminación de pesos y regresión de borde
- (e) DP+RB, red CASCOR regularizada con descomposición de pesos y regresión de borde

Para evaluar la capacidad de predicción de las redes CASCOR respecto a otros modelos, se realiza la comparación respecto a un MLP e, ilustrativamente, se presenta un modelo autorregresivo integrado de promedios móviles (ARIMA). El modelo MLP fue estimado para diferentes conjuntos de rezagos y se seleccionaron los mejores modelos con menor error. La arquitectura del MLP consta de una capa de entrada con una neurona por cada uno de los rezagos considerados, una capa oculta con tres neuronas –la misma cantidad alcanzada por los modelos CASCOR– y una capa de salida; los resultados, se presentan en la Tabla 1. Mediante el algoritmo auto ARIMA de Hyndman & Khandakar (2008), se obtiene el mejor modelo ARIMA (4,0,3)(2,0,2)[12] (Tabla 1). Se destaca que todos los modelos CASCOR regularizados completamente alcanzan un error inferior al de los correspondientes modelos de red CASCOR, sin regularizar, y del MLP; además, sus errores son evidentemente menores, tanto en entrenamiento como en predicción, al obtenido con el modelo ARIMA.

Tabla 1. Valores del error cuadrático medio (MSE) al pronosticar la serie con diferentes modelos.

Modelo	Rezagos	Error Cuadrático Medio (MSE)	
		Entrenamiento	Predicción un año
ARIMA	1, 2, 3, 4, 13, 14	0,4757	0,4999
MLP-1	1 – 3	0,4003	0,1011
CASCOR-1	1 – 3	0,3682	0,1282
CASCOR-EP-1	1 – 3	0,3683	0,1284
CASCOR-DP-1	1 – 3	0,3823	0,1412
CASCOR-RB-1	1 – 3	0,3676	0,0955
CASCOR-EP+RB-1	1 – 3	0,3653	0,0927
CASCOR-DP+RB-1	1 – 3	0,3373	0,1009
MLP-2	1 – 6	0,3751	0,1971
CASCOR-2	1 – 6	0,4564	0,1138
CASCOR-EP-2	1 – 6	0,3779	0,1139
CASCOR-DP-2	1 – 6	0,4347	0,1419
CASCOR-RB-2	1 – 6	0,2881	0,1216
CASCOR-EP+RB-2	1 – 6	0,2754	0,1152
CASCOR-DP+RB-2	1 – 6	0,2622	0,1126
MLP-3	1 – 13	0,2994	0,1948
CASCOR-3	1 – 13	0,2548	0,1512
CASCOR-EP-3	1 – 13	0,2423	0,1909
CASCOR-DP-3	1 – 13	0,3589	0,1278
CASCOR-RB-3	1 – 13	0,2348	0,2420
CASCOR-EP+RB-3	1 – 13	0,1730	0,0926
CASCOR-DP+RB-3	1 – 13	0,2431	0,1090

Los resultados muestran que, en los modelos con tres rezagos, el que mejor se ajusta a la serie es la CASCOR-DP+RB-1; sin embargo, el que excelentemente la pronostica es la CASCOR-EP+RB-1; el error de entrenamiento de CASCOR-EP+RB-1 es 8,17% más alto que el logrado con CASCOR-DP+RB-1, mientras que su error de entrenamiento es 8,85% menor. La diferencia entre ambos es relativamente poca, por tanto, cualquiera de los dos es apropiado para modelar la serie; además, sus errores son menores que los logrados con el MLP-1 y el ARIMA. Por otro lado, los modelos que sólo se regularizaron con EP y DP, CASCOR-EP-1 y CASCOR-DP-1, no lograron mejorar el error logrado por CASCOR-1 sin regularizar; mientras que el CASCOR-RB-1 sí lo hizo, incluso, mejoró el error conseguido con MLP-1.

Cuando se tienen seis rezagos, el modelo CASCOR-DP+RB-2 se perfila como uno de los mejores, pues consigue el menor error, tanto en entrenamiento como en pronóstico; asimismo, el modelo que más se acerca a éste es el CASCOR-EP+RB-2, con un error 4,79% y 2,26% mayor, en entrenamiento y predicción, respectivamente. Entonces, del conjunto de modelos con seis rezagos se observa que, también el CASCOR-EP+RB-2 y el CASCOR-DP+RB-2 son apropiados para modelar la serie, teniendo en cuenta que el CASCOR-DP+RB-2 es el que tiene mejor capacidad de generalización; no obstante, la diferencia de CASCOR-EP+RB-2 respecto a CASCOR-DP+RB-2 es relativamente poca; además, sus errores también son menores que los logrados con el MLP-1 y el ARIMA. Por otro lado, se observa que los modelos que sólo se regularizaron con una técnica logran errores poco aceptables. Consecuentemente, para esta serie, en particular, se consiguen buenos resultados, regularizando completamente la red CASCOR.

El hecho de aumentar a 13 rezagos, muestra que el mejor de todos los modelos es el CASCOR-EP+RB-3, regularizado entre la capa de entrada y la oculta con eliminación de pesos y entre la oculta y la de salida con regresión de borde. Los errores, en entrenamiento y en pronóstico del modelo CASCOR-3, que no tiene ningún tipo de estrategia de regularización, son 32,1% y 38,76% más altos que los alcanzados por CASCOR-EP+RB-3; mientras que los del CASCOR-DP+RB-3 son mayores un 28,84% y 15,05%. Del mismo modo, se nota que no existen ganancias significativas al regularizar la red CASCOR con sólo una técnica. En este orden de ideas, el modelo más adecuado para pronosticar la serie es el CASCOR-EP+RB-3; no obstante, el modelo CASCOR-DP+RB-3 también podría ser tenido en cuenta.

En general, para esta serie, los modelos CASCOR regularizados completamente –entre capa de entrada y oculta, y entre oculta y salida– alcanzan mejores errores que la mayoría de modelos; entonces, los regularizados

completamente son más apropiados para realizar el pronóstico, dado que controlan, en gran medida, las causas del sobreajuste. Además, es notorio que no se encontraron ganancias al regularizar las redes CASCOR con una sola técnica; sin embargo, en algunos casos, se logran resultados aceptables al regularizar sólo con regresión de borde.

Los resultados indican que las redes CASCOR regularizadas completamente pronostican, de manera más precisa, que los MLP, que el modelo ARIMA y que las mismas CASCOR sin regularizar. Entonces, las redes cascada correlación regularizadas permiten encontrar modelos con mejor capacidad de generalización que otras propuestas en la literatura. Los buenos resultados conseguidos respecto a otras técnicas, posibilitan la incorporación de las redes CASCOR en el conjunto de herramientas disponibles para el pronóstico de series de tiempo de precios de la electricidad.

**Agradecimientos:** Los autores expresan sus agradecimientos a los dos evaluadores anónimos, cuyos comentarios permitieron mejorar ampliamente la calidad del artículo.  
**Conflictos de intereses:** Este artículo fue preparado y revisado con la participación de todos los autores, quienes declaran que no existe ningún conflicto de intereses que ponga en riesgo la validez de los resultados presentados.

## BIBLIOGRAFÍA

1. ANGELUS, A. 2001. Electricity price forecasting in deregulated markets. *The Electricity Journal (USA)*. 13(4):32-41.
2. ARMSTRONG, M.; COWAN, S.; VICKERS, J. 1994. *Regulatory Reform: Economic Analysis and British Experience*. Ed. Cambridge: The MIT Press (USA). 392p.
3. CONEJO, A.; CONTRERAS, J.; ESPÍNOSA, R.; PLAZAS, M. 2005. Forecasting electricity prices for a day-ahead pool-based electric energy market. *Internal J. Forecasting (USA)*. (21):435-462.
4. DE MEDEIROS, L. 2004. *Previsão do Preço Spot no Mercado de Energia Elétrica*. PhD thesis, Pontificia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Disponible desde Internet en: <http://www.maxwell.lambda.ele.puc-rio.br/> [con acceso el 02/10/2009].
5. FAHLMAN, S.E.; LEBIERE, C. 1990. The Cascade-Correlation Learning Architecture. *Advances in Neural Information Processing Systems (USA)*. 2:524-532.

6. GARETA, R.; GIL, A.; MONZÓN, A.; ROMEO, L. 2004. Las redes neuronales como herramienta para predecir el precio de la energía eléctrica. *Energía: Revista de Ingeniería energética y medioambiental (España)*. 30(180):67-72.
7. HINTON, G. 1989. Connectionist learning procedures. *Artificial Intelligence (USA)*. (40):185-243.
8. HIPPERT, H.; BUNN, D.; SOUZA, R. 2005. Large neural networks for electricity load forecasting: Are they overfitted? *Internal J. Forecasting (USA)*. 21(3):425-434.
9. HOERL, A.E.; KENNARD, R.W. 1970. Ridge Regression: Biased Estimation for Nonorthogonal Problems. *Technometrics (USA)*. 12(1):55-67.
10. HYNDMAN, R.; KHANDAKAR, Y. 2008. Automatic time series forecasting: The forecast package for R. *J. Statistical Software (USA)*. 26(3):1-22.
11. LU, X.; DONG, Z.; LI, X. 2005. Electricity market price spike forecast with data mining techniques. *Electric Power Systems Research (USA)*. 73(1):19-29.
12. MARQUARDT, D.W.; SNEE, R.D. 1975. Ridge regression in practice. *The American Statistician (USA)*. 29(1):3-20.
13. MASTERS, T. 1993. Practical neural network recipes in C++. Ed. New York: Academic Press (USA). 493p.
14. PILIPOVIC, D. 1998. Energy Risk. Valuing and Managing Energy Derivatives. Ed. McGraw-Hill (USA). 64p.
15. STEINER, F. 2000. Regulation, industry structure and performance in the electricity supply industry. OECD Economics Department Working Papers (Francia). 238:5-25.
16. VELÁSQUEZ, J.D.; DYNER, I.; SOUSA, R.C. 2007. ¿Por qué es tan difícil obtener buenos pronósticos de los precios de la electricidad en mercados competitivos? *Cuadernos de Administración (Colombia)*. 20:259-282.
17. VELÁSQUEZ, J.D.; VILLA, F.A.; SOUZA, R.C. 2010. Predicción de series de tiempo con redes cascada-correlación. *Ingeniería e Investigación (Colombia)*. 30(1):157-162.
18. VELÁSQUEZ, J.D.; DYNER, I.; SOUZA, R.C. 2008. Modelado del Precio Spot de la Electricidad en Brasil Usando una Red Neuronal Auto Regresiva. *Ingeniare: Rev. Chilena de Ingeniería*. 16(3):394-403.
19. VILLA, F.A.; VELÁSQUEZ, J.D.; JARAMILLO, P. 2009. Conrprop: un algoritmo para la optimización de funciones no lineales con restricciones. *Rev. Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia (Colombia)*. (50):188-194.
20. VILLA, F.A.; VELÁSQUEZ, J.D.; SOUZA, R.C. 2008. Una aproximación a la regularización de redes cascada-correlación para la predicción de series de tiempo. *Investigación Operacional (Portugal)*. (28):151-161.
21. WEIGEND, A.S.; RUMELHART, D.E.; HUBERMAN, B.A. 1991. Generalization by weight-elimination with application to forecasting. *Advances in Neural Information Processing Systems (USA)*. 3:875-882.
22. ZHANG, G.; PATUWO, B.E.; HU, M.Y. 1998. Forecasting with artificial neural networks: the state of the art. *Internal J. Forecasting (USA)*. 14(1):35-62.

Recibido: Octubre 25 de 2010

Aceptado: Octubre 13 de 2011

# ENCUENTROS Y DESENCUENTROS: LO ASOMBROSO DE LA EDUCACIÓN

## ENCOUNTERS AND SEPARATIONS: THE AMAZING OF EDUCATION

Nora Aneth Pava-Ripoll<sup>1</sup>, Olga Lucía Ocampo<sup>2</sup>, Aida Josefina Rojas<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Magíster en Educación y Desarrollo Humano. Profesora asistente de la Escuela de Rehabilitación Humana de la Universidad del Valle, Cali, Colombia. Dirección: Calle 4B No 36-00. Edificio 130 - "Heladio Perlaza", Piso 2. Cali (Colombia). e-mail: nora.pava@correounivalle.edu.co. <sup>2</sup> Especialista en estudios sociohumanísticos con énfasis en gestión de proyectos. Directiva docente Municipio de Manizales. Dirección: Calle 48C No. 17-52 Manizales (Caldas). e-mail: olgaocampog07@hotmail.com <sup>3</sup> Terapeuta Ocupacional. Magíster en Educación: Desarrollo Humano. Profesora asistente Escuela de Rehabilitación Humana, Universidad del Valle, Cali, Valle del Cauca, Colombia; dirección: Calle 4B No 36-00. Edificio 130 - "Heladio Perlaza", Piso 2. e-mail: aidar811@gmail.com.

*"Creo, con una seriedad absoluta, que hacer siempre lo que a uno le gusta, y sólo eso, es la fórmula para una vida larga y feliz"*

Gabriel García Márquez

Rev. U.D.C.A Act. & Div. Cient. 14(2): 169-175, 2011

### RESUMEN

La educación ha sido siempre centro de reflexiones, de discusiones, de investigaciones, de procesos de desarrollo e, incluso, de búsquedas constantes de perfecciones, en las que, a través de aciertos y desaciertos, de encuentros y desencuentros, se ha tenido siempre la pretensión de forjar un ser humano más racional. Este artículo revisa la educación en Colombia y se presenta en tres apartados. El primero registra un recorrido histórico sobre la educación en Colombia y desarrolla premisas que demuestran cómo el sistema educativo actual está marcado por este mismo contexto histórico. El segundo aborda discusiones sobre la evolución del concepto de educación, a través de la historia, con miras a fundamentar el tercer apartado, el cual, esboza unas reflexiones finales, en relación con el contexto educativo en la actualidad y propone algunos caminos a seguir, que contribuyen a los ideales educativos del país.

Palabras clave: Historia de la educación, formación, diversificación de la educación, estrategias educativas, educación y cultura.

### SUMMARY

Education has always been a center for reflection, discussion, research and developmental processes. It has also been a center for the constant search for perfection, which through successes and failures, agreements and misunderstandings

has always had the intention of building a more rational human being. This article presents and overview of education in Colombia and is presented in three sections. The first section shows a historical overview of education in Colombia and develops inferences that illustrates how the current education system is marked by the historical context itself. The second section relates to discussions on the evolution of the concept of education throughout history, in order to substantiate the third section, which outlines some final reflections regarding the current educational context and proposes some ways to contribute to the educational ideals of the country.

Key words: Educational history, Training, diversification of education, educational strategies, education and culture.

### INTRODUCCIÓN

La educación, a lo largo de la historia, ha tenido grandes transformaciones que impactan de diferentes maneras los contextos religiosos, sociales, políticos y familiares. Este artículo nace como producto de una reflexión conceptual que se hacen las autoras frente a la situación actual de la educación y tiene como propósito presentar un recorrido histórico sobre la educación en Colombia, para demostrar cómo, tanto el concepto de educación como el

sistema educativo actual, están marcados por ese mismo contexto histórico. Al sistema educativo se le ha atribuido responsabilidad frente al futuro Latinoamericano, por eso es importante analizar su situación e impacto.

La educación es un espacio propicio para encuentros y desencuentros en beneficio de la apropiación de bienes culturales que, a la vez, permiten desarrollar competencias cognitivas, sociales, lúdicas, afectivas, emocionales y comunicativas en sus actores, para conocer y enfrentar los conflictos y los retos de la vida cotidiana y asumir así las realidades en pro de una adecuada formación. La reflexión planteada hace una mirada crítica, en un ejercicio de objetar realidades y de pensar y existir en las incertidumbres del hoy.

Es por esto que en este artículo, se plantean algunas reflexiones que permiten visualizar el escenario educativo, por lo que se describe en tres apartados. El primero de ellos plantea un recorrido histórico sobre la educación en Colombia y desarrolla premisas que evidencian cómo la educación actual está influenciada por el contexto histórico y la importancia de conocer, en profundidad, la realidad del sector educativo. El segundo aborda las discusiones sobre la evolución histórica del concepto de educación, que permiten fundamentar el tercer y último apartado, en donde se plantean unas reflexiones finales, las cuales, formulan inquietudes en relación con el contexto educativo en la actualidad y propone algunos caminos a seguir que contribuyen a los ideales educativos del país.

## METODOLOGÍA

Para el desarrollo de este artículo, las autoras elaboraron un mapa conceptual sobre las categorías centrales a desarrollar: historia educativa y concepto de educación, las cuales, guiaron las búsquedas documentales en torno a éstas y, a la vez permitieron llegar a las reflexiones finales. Las discusiones, las intersecciones y los entramados construidos, a partir estas revisiones, posibilitaron afinar estas categorías de trabajo y proseguir con la redacción del texto.

### Algunas reflexiones sobre la historia educativa en Colombia

Cuando los españoles llegaron al territorio que hoy ocupa Colombia encontraron innumerables riquezas; ante el aislamiento que vivían quienes en ese entonces las poblaban y debido al desconocimiento que tenían de lo que representaban sus pertenencias para los recién llegados, les fue fácil apoderarse de ellas y someterlos para que continuaran en el trabajo a su servicio. Esta situación desventajosa hizo que se pusiera en riesgo su identidad cultural, pues debían aprender el idioma, las costumbres y la religión de los invasores.

Y en esta historia singular, trazada después por los movimientos independentistas y por el inicio de una nueva nación, se tejieron las bases del sistema educativo actual que, tal como lo afirman Pava-Ripoll y Ocampo (2007), ha estado marcado por un sinnúmero de ritos, que se han perpetuado a lo largo del tiempo:

Tanto en la época de la Conquista como de la Colonia, las condiciones no eran propicias para el nacimiento de la escuela y el maestro en Colombia. Según Martínez (1986), lo que en esa época se podía llamar educación, se restringía a la existencia de ‘Corporaciones Religiosas’, denominadas Colegios Mayores y Seminarios. A éstos, sólo podían entrar aquellas capas sociales llamadas “gentes principales y beneméritas”, que tenían aspiraciones particulares al sacerdocio y a la jurisprudencia. Además de estos estudios, existía la modalidad de enseñanza hogareña, que era exclusiva de las clases poderosas: terratenientes, comerciantes, alta burguesía, quienes sostenían en sus casas, a los institutores personales, quienes enseñaban a sus hijos, pero sin dejar de ser parte de la servidumbre.

Saldarriaga (2003) afirma que en Occidente apareció la escuela moderna a finales del siglo XVI, que tenía como finalidad asegurar la democracia, la cual, estaba soportada en un funcionamiento disciplinario o, al contrario, que la institución disciplinada fundara la democracia. Aunque se buscaba formar individualidades, lo que estaba en el fondo era la uniformidad y la normalidad colectiva.

Así mismo, determina que en las primeras décadas del siglo XVIII apareció una modalidad de instrucción, en las principales ciudades del país: Santafé, Tunja, Popayán y Cartagena. Por el mecanismo de donaciones, se fundaron cinco hospicios en todo el país, llamados “Escuelas Pías”, anexas y regentas a la Compañía de Jesús y empezó así a esbozarse un horizonte para el nacimiento de la institución educativa.

Saldarriaga (2003) asevera que, en 1767, Carlos III, con el propósito de impulsar la vigilancia y el control del Rey, expulsó a la Compañía de Jesús de sus dominios. Se dio, entonces, paso a la educación pública, a través de leyes promulgadas por el Rey, que trataban de subsanar el vacío dejado por este sector religioso. A partir de este momento, la concepción de educación como un bien de carácter privado y en consecuencia de responsabilidad de la familia y de la iglesia, se cambió por una comprensión política de la educación, entendida como un bien público y, por tanto, responsabilidad del Estado.

Sin embargo, en esta concepción lo que primaba era su consideración como un elemento de utilidad social, como

lo afirma Jaramillo (1980); todo indicaba que el impulso de la enseñanza pública era un elemento fundamental que contribuía a garantizar el control estatal sobre el individuo con miras al proyecto de formación de ciudadano. Se pensaba y no sin razón que quien no era cultivado y formado en la escuela podría llegar a constituirse en un eventual violador del pacto social, en un usurpador de los poderes constituidos y en un transgresor de los principios morales.

Durante la época de la independencia, el tema de la educación entró en decadencia, por la crisis política del momento y por la inestabilidad del Estado que no lograba definir las características de su propia constitución. En Colombia, entre 1845 y 1847, se comenzó a trabajar con la pedagogía pestalozziana, centrada en el maestro y cuya función principal era la transmisión del conocimiento que el estudiante asimilaba. Bajo la presidencia de Mariano Ospina Rodríguez, conservador, en la Escuela Normal Lancasteriana de Bogotá, don José María Triana impulsó esta pedagogía para mejorar las clases de gramática y de aritmética. Treinta años después, bajo un gobierno liberal, se expande a las Escuelas Normales oficiales; se considera a la Escuela Lancasteriana como un modelo oficial y moderno que debía reformar las mentes de los niños colombianos. El final de esta era, se dio, hacia la década de los años 30, con un método llamado Escuela Activa. Entonces devino la pedagogía tradicional, pasiva, memorista, verbalista y represiva (Saldarriaga, 2003).

Saldarriaga (2003) ratifica, además, que la influencia anglosajona fue traída, entonces, con las ideas de dos ingleses: Bell y Lancaster. Las escuelas eran dirigidas por maestros, quienes supervisaban y tenían a su servicio monitores, quienes a la vez eran estudiantes aventajados de la clase, que servían de ayudantes para revisar y controlar las tareas que ellos colocaban; el monitor disponía de una pizarra donde colgaba las tablas de Pestalozzi para enseñar a leer y a contar y, al mismo tiempo, vigilaba y castigaba a los otros alumnos.

Entre el siglo XIX y XX, se introdujo el modelo de enseñanza mutua, cuyo sentido era tener en las escuelas más niños a menores precios. La tradición anglosajona continúa con un autor importante que es John Dewey, norteamericano, considerado como filósofo de la educación. Su planteamiento central era que en la escuela el niño fuera formado para la vida, a través de una democracia, donde se experimentaran diversas posibilidades dentro de la misma escuela.

A comienzos del siglo XX, en América del Norte, John Dewey (1995), lanzó su propuesta pedagógica reconocida con la expresión “aprender haciendo”, que fue la semilla para el surgimiento de la llamada escuela activa, que aseguraba

que los niños, a partir de su propia experiencia, desarrollaran las actividades a partir de sus propios intereses; el papel del maestro debía ser de guía, de acompañante y de facilitador del proceso.

Esta propuesta educativa fue traída a Colombia, inicialmente, por el Gimnasio Moderno de Bogotá, fundado en 1915, pero luego fue adoptada como alternativa de trabajo en el sector rural, con el nombre de Escuela Nueva. Esta metodología fue privilegiada por el Estado, dado el reducido número de estudiantes y, por consiguiente, de docentes en el área rural, con lo cual, la opción de tener aulas multigradales, en las que un solo docente guiara el trabajo de los estudiantes, por medio de materiales preparados de acuerdo con el nivel de cada uno y con el contexto rural, se constituyó en la más viable y oportuna.

Hoy en día, todavía en el sector rural colombiano se trabaja con la metodología Escuela Nueva e, incluso, se ha llevado ésta a instituciones del sector urbano, con el nombre de Escuela Activa Urbana, en ciudades como Manizales, con el apoyo de la empresa privada.

Estos hechos demuestran que los cambios en la educación en Colombia han sido influenciados por movimientos pedagógicos externos y, especialmente, por las tendencias de desarrollo en el ámbito mundial. Así, en la década de 1980, se introdujeron reformas que privilegiaban la formación en valores, la ecología, la formación sexual, la formación para la participación y la organización comunitaria que, en últimas tendían a pensar una educación que respondiera a necesidades humanas de las personas y no exclusivamente a necesidades técnicas que facilitaran la vinculación a los espacios laborales (MEN, 1986).

No obstante, estos cambios no tuvieron el impacto esperado, pues la propuesta no fue construida de manera participativa y se desconocieron la heterogeneidad regional y las diferencias entre lo urbano y lo rural, es decir, no se consideraron las características de una sociedad multiétnica y pluricultural. Esta situación impidió que la propuesta respondiera a las necesidades de desarrollo del país, si se tiene en cuenta que, de una parte, la mano de obra calificada y no calificada no suplía los requerimientos técnicos, tecnológicos y científicos que le garantizaran al país su activa participación en el mercado internacional y, de la otra, el hecho que la gente no desarrollara un sentido de pertenencia y de apropiación con la historia y el devenir de su país. Esto limitó la posibilidad de proponer, desde las mismas comunidades, alternativas de desarrollo endógeno coherentes con las condiciones y la calidad de vida deseadas por las personas (MEN, 1986).

Más adelante, en la década del 90, se marcó una época de grandes cambios, que surgieron a raíz de la crisis de la década anterior; apareció, entonces, la necesidad de transformar a Colombia en un país competitivo, en el ámbito internacional, para lo cual fue fundamental redefinir los objetivos y los fines de la educación en Colombia, siendo necesario analizar los diferentes aspectos que, de una u otra manera, influían en la educación: lo económico, lo cultural y lo social, el sector empresarial público y privado y el papel de las comunidades educativas, en aras de fortalecer cuatro pilares: aprender a conocer, aprender a hacer, aprender a vivir y aprender a ser.

Estos cambios fueron impulsados a partir de la promulgación de la ley 115 de 1994, en cuyo objetivo se planteó la necesidad de forjar niños, niñas y jóvenes participativos, que exploten al máximo sus capacidades intelectuales, su creatividad y sus destrezas para el aprendizaje; tal como lo expresaba el Plan Decenal de Educación 1996 – 2005, “*se debe comprender la educación como la fuente principal de saber y la más cierta posibilidad de desarrollo humano, cultural, económico y social de la nación*” (MEN, 1996).

Ya a inicios del siglo XXI, desde el Ministerio de Educación Nacional, se promulgó la Revolución Educativa, con políticas que buscaban el fortalecimiento de cinco aspectos: cobertura, calidad, pertinencia laboral, capacitación técnica e investigación científica.

En la actualidad, en desarrollo del Plan Decenal de Educación 2006 – 2015, considerado un pacto social por la educación, construido de manera participativa y discutido ampliamente por los diferentes actores del proceso educativo, se proponen unos desafíos para la educación para el siglo XXI, que se resumen en: globalización y autonomía; educación en y para la paz, la convivencia y la ciudadanía; renovación pedagógica y uso de las Tecnologías de la Información y la Comunicación en la Educación y ciencia y tecnología integradas a la educación (MEN, 2006). Tales desafíos, cinco años después de planteados, son todavía desafíos y su transformación en realidades está aún en proceso de construcción.

### **La evolución del concepto de educación: aportes a la discusión actual**

Variadas y numerosas comprensiones sobre educación han guiado el actuar en este sector de la vida. Desde Platón (2003), quien la describió como dar al cuerpo y al espíritu toda la belleza y la perfección de la vida, existen autores como Herbart (1935), con su planteamiento que la educación tiene por objeto formar el carácter en vista de la moralidad; Locke (1986), afirmando que el fin de la educación es llegar a poseer una mente sana y un cuerpo sano. Por otro lado, Rousseau

(1997), asevera que la educación es el arte de educar a los niños y formar a los jóvenes, mientras que John Dewey (1995), la puntualiza como la reconstrucción de la experiencia que da significación a la existencia y ayuda a encaminar la experiencia. Ahora bien, para Durkheim (2001), la educación es la acción ejercida por las generaciones adultas sobre las que aún no están maduras para la vida social.

Por su parte, Zambrano (2001) plantea que al tratarse de una actividad que tiene como objetivo principal la modificabilidad de la condición primitiva del mamífero humano y, en suma, su socialización, todo acto de sistematización normativa vuelve imposible el intento mismo por definirla. Para comprender la naturaleza y el alcance de sus finalidades, se necesita formular y desarrollar interrogantes, tales como: ¿qué es educar?, ¿para qué se educa?, ¿cuándo se educa?, ¿cómo y a través de qué se educa?, ¿cuándo se educa?

De otro lado, el informe Mundial del Programa de la Naciones Unidas para el Desarrollo, en el 2005, sobre el Desarrollo Humano, plantea la educación como aspecto fundamental de desarrollo humano y como un potencializador de las capacidades de las personas.

Hoy en día, el concepto de educación se asume como un proceso fundamentado en la persona humana; por lo tanto, su carácter teleológico, se debe orientar hacia la cualificación de las características particulares de cada individuo como ser único, con capacidades de construir y de reconstruir un mundo nuevo. Según Flórez (1999), la educación está enmarcada en la formación integral de personas, cuyas dimensiones de desarrollo se encuentran en constante relación.

No existe, pues, un concepto unificado de educación, pero en todas estas acepciones, se entiende la educación como praxis social, en la que se involucran constantes relaciones, se reconstruyen sujetos, se conjugan escenarios. La educación, como praxis social, es generadora de cultura que construye y hace circular símbolos.

Y es que los sujetos no sólo interiorizan la cultura, sino que asumen una posición dinámica, lo que hace que la cultura no sea estática. La educación coadyuva a la formación de sujetos partícipes del proceso educativo; sujetos críticos, capaces de emitir propuestas y de tomar buenas decisiones y, en últimas, sujetos dispuestos a replantearse constantemente, con miras a mejorar su proceso de vida.

La educación es interacción, apropiación de conocimientos y valores, en el interior de procesos históricos, sociales y culturales específicos, es decir, la educación es cultural por

excelencia y esto hace que implique acciones, concepciones, saberes y conocimientos.

Desde esta perspectiva, el proceso educativo implica interacciones complejas, las cuales, incluyen aspectos simbólicos, afectivos, comunicativos, sociales, de valores, entre otros; es por esto, que los maestros deben contribuir a que los educandos aprendan a pensar, a sentir, a actuar y a desarrollarse como personas (Euscategui et al. 2006).

Por último, vale la pena puntualizar que durante la primera década del siglo XXI, con el apoyo de las nuevas tecnologías de la información y la comunicación, se hace evidente que la educación tiene posibilidades que le permiten orientarse hacia lo desconocido y facilitarle a los estudiantes alcanzar su potencial e interactuar con el mundo (López, 2010).

### Unas reflexiones finales

Las siguientes son algunas reflexiones sobre el proceso educativo del país, que permiten trazar algunos caminos a seguir en esta tarea; cabe aclarar que esta realidad no está alejada de la de otros países de Latinoamérica.

A lo largo de la historia, a la educación se le atribuyen papeles fundamentales de apoyo a todos los procesos de desarrollo de los países. Entre estos papeles está el de instrucción pública, el de la creación y recreación de cultura, el de ser formadora de mano de obra para la industria y el Estado; estas posturas demuestran la fuerte influencia que ejerce el sector educativo en el ámbito económico de cada país. De esta forma, mientras la población esté sin educación, se arriesga la posibilidad de crear un país preparado para la competencia en los mercados internacionales y se disminuyen los espacios vitales generadores de autonomía, de participación, de crítica y de creatividad.

Tampoco se desconoce la función velada, pero en ocasiones imprescindible, que han jugado las Tecnologías de la Información y la Comunicación. Según Adell (2002), estas tecnologías desempeñan un papel fundamental en la configuración de la sociedad y la cultura. Desde nuestros antepasados cazadores – recolectores, que pintaban figuras en las paredes de sus cuevas, hasta el presente, la tecnología transforma al ser humano y lo hace para bien y para mal. Las tecnologías ya asentadas a lo largo del tiempo, las que se utilizan de manera habitual o desde la infancia, están tan bien integradas a las vidas de las personas, como una segunda naturaleza que, para algunas, se ha tornado invisible. En este sentido, las tecnologías se utilizan hasta tal punto que las personas no son conscientes de cómo éstas contribuyen a cambiar las cosas.

Este hecho, sin duda, marca un hito en la historia educativa. La perspectiva tradicional de la educación, incluso de la educación a distancia, está cambiando y esto implica el manejo también de nuevas terminologías. Cada vez son mayores las ofertas basadas en las redes telemáticas que tratan de cautivar a quienes son partícipes de los entornos de enseñanza y de aprendizaje.

Según Bradshaw et al. (2007), la brecha digital es un factor de desigualdad, razón por la cual, incluir este aspecto dentro del proceso educativo es algo obligatorio, si se considera desde lo ético y desde la justicia social, puesto que si se ignora este conocimiento en la actualidad, traería más pobreza. La tecnología actual, como lo afirma López (2010), permite un mayor acceso a la información.

Es por eso que hoy en día se privilegia la necesidad de adaptar el sistema educativo a un entorno en constante devenir. Para ello es necesario inducir cambios culturales en el seno de las instituciones, los cuales, no se pueden generar por decreto sino que deben surgir de las propias vivencias, concepciones, actitudes y prácticas de los maestros, cuyos procesos de transformación no pueden ser forzados sino que tienen que partir de las propias convicciones.

De otro lado, la globalización, que en parte es el resultado de las dinámicas históricas cambiantes de la humanidad, no sólo plantea desafíos teóricos y metodológicos para la educación, sino que exige nuevas competencias a los ciudadanos –que, indudablemente, no se adquieren sólo en el escenario educativo–. Las consecuencias económicas de un inadecuado sistema educativo no se pueden pasar por alto. La educación hoy en día, más que un servicio o un derecho, es un producto que se oferta y se demanda como cualquier otro producto del mercado. En este sentido, Da Silva-Araujo (2010) tiene razón al afirmar que los discursos del campo de la educación expresan resistencias y luchas territoriales permanentes contra políticas, tanto internas como externas.

Se busca, entonces, que la educación sea la fuente principal de saber y se constituya en la más cierta posibilidad de desarrollo, no sólo económico sino humano, cultural y social de la Nación. Como lo indica Martínez (2004), la educación, de acuerdo con las agencias internacionales de desarrollo, logra tener valor al unirse con sistemas globales de producción, es decir, si entra en juego con las competencias económicas, para matizar el fortalecimiento de la democracia.

Es por esto que las dificultades económicas que atraviesa el país, hacen que el sistema educativo enfrente día tras día problemas no tan inesperados: el porcentaje de inversión en el sector educativo es restringido en relación con el de

otros sectores; la poca presencia del gobierno en regiones muy apartadas y golpeadas por problemas de orden público, hace que la identidad cultural y los fines altruistas de este bien social se diluyan: en un pueblo con hambre, ¿cómo pensar en desarrollo integral de la persona, en formación de un pensamiento autónomo y crítico, en la posibilidad de elaborar juicios propios, en conferir libertad de juicio, sentimiento e imaginación a nuestros niños?

En este contexto, es más fácil educar cuando se está convencido que eso es lo que se quiere hacer, cuando se está decidido a hacer parte de esa historia; por eso es necesario entender el proceso educativo como ese 'cuento', con actores, con guiones y con escenarios que tejen entre todos distintas realidades; un 'cuento', en donde se tiene la oportunidad de ir llenando páginas de realidades construidas de manera colectiva, de aferrarse a un final en el que no habrá vencedores ni vencidos, sólo encuentros y desencuentros constantes, en los que, protagonistas o no de estas historias, se podrán asombrar frente a la capacidad para hacer perdurables y perennes las riquezas alcanzadas.

Colombia requiere hoy de profesionales que se preocupen y se comprometan con el desarrollo de sus gentes. Sólo la convergencia de los intereses comunes en un escenario de vida determinado, como el educativo, podrá trazar los procesos de desarrollo necesarios para lograr alcanzar los ideales deseados.

## BIBLIOGRAFÍA

1. ADELL, J. 2002. World Wide Web: Un Sistema Hipermedia Distribuido Para La Docencia Universitaria. En: Blázquez, F., Cabero, J. y Loscertales, F. (eds.). Nuevas tecnologías de la Información y la Comunicación para la Educación. Sevilla: Ediciones Alfar, p.114-121.
2. BRADSHAW, Y.; BRITZ, J.; BOTHMA, T.; BESTER, C. 2007. Using Information Technology to create global classrooms: benefits and ethical dilemmas. IRIE. International Review of Information Ethics. Disponible desde Internet en <http://www.i-r-i-e.net/inhalt/007/36-badshaw> [con acceso el 11/17/2010].
3. DA SILVA-ARAÚJO, S.M. 2010. Educação do campo no Brasil: um discurso para além do pós-colonial? Revista Latinoamericana de Ciencias Sociales, Niñez y Juventud (Colombia). 8(1):221-242.
4. DEWEY, J. 1995. Democracia y Educación: Una introducción a la filosofía de la educación. Ed. Morata (España). 319p.
5. DURKHEIM, E. 2001. Educación y sociología. Cuarta Edición Ed. Coyoacán (México). 131p.
6. EUSCATEGUI, R.; PINO, S.; ROJAS, A. 2006. La Formación Humana en la Educación Superior. Ed. Universidad de San Buenaventura (Colombia). 132p.
7. FLÓREZ, R. 1999. Evaluación pedagógica y cognición. Ed. McGraw Hill (Colombia). 226 p.
8. HERBART, J. 1935. Pedagogía general derivada del fin de la educación. Ed. Espasa-Calpe (España). 283p.
9. JARAMILLO, J. 1980. Manual de Historia de Colombia. Tomo III. Instituto Colombiano de Cultura (Bogotá). 250p.
10. LÓPEZ, J. 2010. La incorporación de las nuevas tecnologías en la educación universitaria. Rev. Col. Educación Superior. 2(4):32-38.
11. LOCKE, J. 1986. Pensamientos sobre la educación. Ed. Akal S.A. (Madrid). 386p.
12. MARTÍNEZ, A. 1986. Escuela, maestro y métodos en Colombia 1750-1820. Universidad Pedagógica Nacional (Colombia). 157p.
13. MARTÍNEZ, A. 2004. De la Escuela Expansiva a la Escuela Competitiva. Ed. Anthropodos (España). 425 p.
14. MINISTERIO DE EDUCACIÓN NACIONAL MEN. 1986. Para dónde vamos en educación: Encuentro Nacional. Presidencia de la República. Bogotá (Colombia). 180p.
15. MINISTERIO DE EDUCACIÓN NACIONAL MEN. 1996. Plan Decenal de la Educación 1996-2005. Presidencia de la República. Santafé de Bogotá. (Colombia). 20p.

16. MINISTERIO DE EDUCACIÓN NACIONAL MEN. 2006. Plan Decenal de la Educación 2006-2015. Presidencia de la República. Santafé de Bogotá. (Colombia). 54p.
17. PAVA-RIPOLL, N.; OCAMPO, O. 2007. La comunicación en las relaciones pedagógicas: conflicto y solución. Revista Cultura del Cuidado de Enfermería (Colombia). 4(2):51-58.
18. PLATÓN. 2003. Diálogos. Volumen IV: República. Ed. Gredos (Madrid). 502p.
19. PROGRAMA DE LAS NACIONES UNIDAS PARA EL DESARROLLO PNUD. 2005. Informe sobre Desarrollo Humano 2005. Ed. Mundi-Prensa (México). 418p.
20. REPÚBLICA DE COLOMBIA. 1991. Constitución Política de Colombia. Ed. Legislación Económica (Santafé de Bogotá). 465p.
21. ROUSSEAU, J. 1997. Emilio o de la Educación. Ed. Alianza (España). 770p.
22. SALDARRIAGA, Ó. 2003. Del Oficio del Maestro. Prácticas y teorías de la pedagogía moderna en Colombia. Ed. Colección Pedagogía e Historia (Colombia). 316p.
23. ZAMBRANO, A. 2001. Pedagogía, educabilidad y formación de docentes. Ed. Nueva Biblioteca Pedagógica (Colombia). 172p.

Recibido: Marzo 18 de 2011

Aprobado: Octubre 11 de 2011

# LA RESPONSABILIDAD SOCIAL COMO GENERADORA DE VALOR EMPRESARIAL: HACIA LA CONSTRUCCIÓN DE UN MODELO DE BALANCE SOCIAL PARA LAS MIPYMES

## SOCIAL RESPONSIBILITY AS A BUSINESS VALUE GENERATOR: TOWARDS THE CONSTRUCTION OF A SOCIAL BALANCE MODEL FOR SMEs

Doris Emilia Guerrero <sup>1</sup>, Jorge Humberto Sandoval <sup>2</sup>

<sup>1</sup> Abogada. Filósofa. M.Sc. Estudios Humanísticos. Docente investigadora, Facultad de Ingeniería Comercial U.D.C.A. e-mail: dorisgue@udca.edu.co <sup>2</sup> Economista. Mercadotecnista. M.Sc. Docencia Universitaria. Docente investigador, Facultad de Ingeniería Comercial. U.D.C.A. e-mail: jorhumsan@hotmail.com

Rev. U.D.C.A Act. & Div. Cient. 14(2): 177-186, 2011

### RESUMEN

El mundo empresarial no puede ignorar los cambios suscitados que han transformado la definición actual de desarrollo, como un quehacer que promueve la solidaridad, el respeto a la naturaleza y el compromiso con los seres humanos. Las empresas que no presenten a la sociedad resultados sociales positivos tendrán una desventaja competitiva cada vez mayor, pues perderán su razón de ser en la misma como facilitadoras para la consecución del bienestar general. Desde esta perspectiva es necesario iniciar o fortalecer políticas, objetivos y estrategias empresariales, que permitan a las Mypimes atender, adecuadamente, las necesidades de sus grupos de interés, en el marco de un contexto sustentable. En consecuencia, el estudio pretende diseñar un modelo de balance social para las Mypimes, que posibilite identificar los factores y las acciones que promueven las buenas prácticas empresariales y formular un plan estratégico de responsabilidad social empresarial. El diseño metodológico, se estructuró en tres momentos: bases conceptuales de balance social y RSE, análisis de modelos existentes y la identificación de la unidad de análisis o población de 1020 empresas del sector norte de la ciudad de Bogotá y una unidad de trabajo correspondiente a 26. Se utilizaron, como instrumentos de recolección de información, la encuesta piloto estructurada y las entrevistas en profundidad. Se diseñó el modelo de diagnóstico, de evaluación y de seguimiento de Balance Social para las mypimes, lo que permitirá cualificar las buenas prácticas empresariales, a través de indicadores de desempeño laboral, social y ambiental, de tal manera que se podrá formular un Plan Estratégico de Responsabilidad Social Empresarial.

Palabras clave: Modelo, balance social, buenas prácticas empresariales, Mypimes.

### SUMMARY

The business world cannot ignore the changes brought about which have transformed the current definition of development as a task that promotes solidarity, respect for nature and commitment to human beings. Companies that do not present to society positive social results will have an always greater competitive disadvantage, since they lose their raison d'être as facilitators for achieving the general welfare. From this perspective, it is necessary to initiate and / or strengthen policies, objectives and business strategies that enable SMEs to address adequately the interests of its stakeholders within a sustainable context. Consequently, this study aims to design a model of social balance for SMEs, to identify the factors and actions that promote good business practices and develop a strategic plan for corporate social responsibility. The methodological design was divided into three stages: conceptual foundations of social reporting and CSR, analysis of existing models and identification of the analysis unit or population of 1020 companies in the northern sector of Bogota and a unit of work for 26, which were identified as the most representative ones, according to the formulated criteria. As instruments of data collection, pilot survey, the structured survey and interviews were used. A diagnostic, evaluative and monitoring model of social balance for SMEs was designed, which permits to qualify good corporate practice through performance, labor, social and environmental indicators, with the purpose of formulating a Strategic Plan of Social Responsibility for the company.

Key words: Model, social balance, good business practices, SMEs.

## INTRODUCCIÓN

Se entiende por Responsabilidad Social Empresarial (RSE) un modelo de gestión ético, en el que las organizaciones, de manera voluntaria, se comprometen y responden por sus actuaciones económicas, sociales y medioambientales frente a los grupos de interés, de tal forma que contribuyan al desarrollo sostenible y a la creación de valor de todo el sistema empresarial, desde una perspectiva compleja. A partir de esta definición, este estudio indagó por su génesis y desarrollo, con el fin de proponer un modelo de diagnóstico, de evaluación y de seguimiento de Balance Social para las Mypimes y la formulación de un Plan Estratégico de Responsabilidad Social Empresarial.

A nivel mundial, se han conformado organismos, políticas, maneras de aplicar y evaluar la RSE, como las directrices del OCDE GUIDELINES, consideradas como un código de conducta corporativa para multinacionales, creado en 1976 y revisado en el 2000. Es un instrumento para el mejoramiento de las relaciones entre negocio y sociedad, teniendo como principal objetivo establecer políticas voluntarias que promueven la transparencia en las relaciones laborales, la actuación ambiental, el control de la corrupción, la defensa de la competencia y del consumidor.

Por su parte, el Instituto de Responsabilidad Social y Ética, en 1999, propone un manual para el mejoramiento de los índices de contabilidad social y ética e indica la necesidad de establecer auditorías periódicas y reportes constantes de las empresas. El Sistema de Responsabilidad Social 8000 (SA 8000), creado en 1997, en Estados Unidos, para mejorar el ambiente de trabajo y evitar la explotación laboral, mediante la aplicación voluntaria de estándares de productividad, combinados con verificaciones independientes y reportes públicos periódicos.

Desde 1996, la organización Suiza para la estandarización, crea las Normas ISO 14000, 14063, 26000. La primera tiene por finalidad proveer estándares que permitan a las empresas manejar y evaluar el impacto y los riesgos ambientales; la segunda desarrolla una guía para el reporte sostenible y la tercera es la norma guía de responsabilidad social, que pretende fomentarla como estrategia de negocios y contribuye a mejorar los impactos económicos, ambientales y sociales de la empresa y la creación de cadenas de valor para los grupos de interés (stakeholders), dentro de parámetros de RSE (Lizcano, 2004).

En Europa, la Responsabilidad Social es promovida por organismos gubernamentales y por iniciativas privadas. Buscan un mayor compromiso de las empresas con los trabajadores y con el medio ambiente, mediante la creación de certificaciones sociales-ambientales y el otorgamiento de reconocimientos (Perdiguero, 2005).

Por su parte, las iniciativas privadas se han concretado en tres tipos de instituciones: organizaciones creadas por las propias empresas, cuyo objetivo es formar una red de información para constituirse en un soporte de consulta a la hora de aplicar criterios de RSE. En la actualidad, la red más importante es la CSR-Europa, que forma parte de la mundial CSR-Mundo y que se encuentra presente en 14 países. La segunda, en fundaciones y en organismos no gubernamentales y la generación de redes empresariales, haciendo explícita la necesidad y los beneficios de incorporar criterios de RSE y, por último, en cámaras, en confederaciones y en asociaciones que otorgan reconocimientos a aquellas entidades enmarcadas dentro de un espíritu empresarial (Yepes López, 2007).

En América Latina, la Confederación Latinoamericana y del Caribe de la Mediana y Pequeña Empresa (CLAMPI) fijó la visión de la Pyme sobre los Objetivos del Milenio. El Banco Interamericano de Desarrollo (BID) realizó una investigación sobre el compromiso con la RSE en las pymes del Continente, cuyo estudio de campo mostró que la gran mayoría de las empresas realizaban actividades ligadas a la RSE, en diferentes grados de implantación, siendo las empresas del sector manufacturero, las que presentaban los mayores desarrollos (Pinto, 2006).

En Colombia, hace más de 17 años, se han venido desarrollando actividades estratégicas de difusión de la RS, a través de varios organismos públicos y privados. La Asociación Nacional de Industriales ANDI, la Cámara Junior de Colombia en asocio con la Organización Internacional del Trabajo OIT, han emprendido una dinámica tendiente a que la empresa adopte, voluntariamente, códigos de conducta, como los principios éticos y valores del empresariado nacional, que aglutine a todos los grupos de interés. Desde el 2007, cursa el proyecto de ley 031 en el Congreso Nacional sobre Responsabilidad Social Empresarial (RSE), aprobado por el Senado en primer debate y con el fin de sugerir a la empresa pública y privada el cumplimiento de mínimos sociales y ambientales; sin embargo, a futuro, el sector empresarial se debe preparar para presentar y publicar reportes de sustentabilidad, conjuntamente con sus balances económico-financieros (Piñeros, 2007)

El Balance Social (BS) tiene sus orígenes en Estados Unidos en los años setenta, debido a los requerimientos de las

empresas privadas por mejorar su imagen, siendo Singer la primera en aplicarlo, en 1992. En los últimos años y a partir del interés suscitado por el tema de la RSE, varias organizaciones internacionales y nacionales han empezado a elaborar y hacer públicos sus balances sociales. Así, en Francia, se promulgó en 1997 una ley, para exigir a las grandes empresas presentar y ejecutar un BS anual, junto con el balance económico.

En Latinoamérica, Argentina decretó en el 2002, la presentación obligatoria de un BS a todas las empresas que tuvieran vinculados más de quinientos trabajadores. Pero ha sido en Chile y en Brasil, donde se ha hablado de modelos regionales (Lima, 2001).

Respecto de los principales modelos aplicados a nivel internacional, se puede citar los siguientes: el Reporte Global (GRI), creado en 1997, por el Instituto de Economías Ambientalmente Responsables (CERES) y el Programa de Medio Ambiente de Naciones Unidas, con el propósito de establecer una relación de identidad entre los reportes corporativos de sustentabilidad y los financieros; el AA1000, presentado por el Instituto de Responsabilidad Social y Ética propuesto, para que las empresas mejoren su desempeño ético y moral; el modelo IBASE planteado en Brasil, predomina la identificación de datos que pueden ser expresados en forma cuantitativa (Thevenet, 2002) y, por último, el CRS Matriz Europea, un modelo que le permite a las empresas reportar, comunicar y hacer Benchmarking.

A nivel de estudios e investigaciones académicas, se destaca el publicado en Paper International, de Ioannou & Serafeim (2011), en el que después de realizar un análisis comparativo en más de 58 países, se evidencia los efectos positivos de los informes obligatorios de sostenibilidad y las prácticas de gestión, socialmente responsable. En particular, concluye que la divulgación del Balance Social conduce al aumento de la responsabilidad social de los líderes empresariales, a la priorización del desarrollo sostenible, a la capacitación del personal, al aumento en la aplicación de la ética empresarial, a la disminución de la corrupción y a una mayor credibilidad. De igual manera, se identifica que estos efectos son mayores en los países que tienen fuertes mecanismos de aplicación y aquellos en donde los informes de sostenibilidad se hacen con regularidad.

## MATERIALES Y MÉTODOS

La metodología implementada contempló elementos de tipo cuantitativo, que determinó el tamaño de la población, conformada por 1020 Mipymes, de la localidad de Usaquén y una zona representativa del barrio Santa Ana (sector Norte

de la ciudad de Bogotá), de alta concentración de este tipo de organizaciones; ello permitió su estratificación y su categorización, según criterios como: tamaño, sector productivo, objeto y razón social y ubicación geográfica, los cuales, fueron definidos técnicamente, a través del diseño que estableció el tamaño de la muestra, en 26 Mipymes.

De igual manera es cualitativa, ya que permitió el análisis e interpretación de la naturaleza actual de las Mipymes seleccionadas como unidad de trabajo, para lo cual, se aplicó el método de investigación acción participativa, que involucró a todos los grupos de interés impactados con las actividades empresariales.

Para estos efectos, se tomó como unidad de análisis las medianas y las pequeñas empresas del grupo objetivo definido y se identificaron categorías, tales como: acceso a la información, interés por participar en el proceso, ubicación sico-gráfica y sector económico. Con los criterios anteriores, se definió la unidad de trabajo y, con ellos, se adelantaron conversatorios, desayunos de trabajo y entrevistas en profundidad con informantes clave, que permitieron el diseño del modelo, no como un producto de la construcción de los investigadores sino como resultado que involucró a todos los actores en el proceso de elaboración, quienes conocedores de sus expectativas y sus necesidades, propenden por su bienestar social.

Así mismo, el enfoque seleccionado es hermenéutico, puesto que al indagar sobre la realidad del compromiso social de las Mipymes, favoreció la contrastación con las concepciones de carácter epistemológico derivadas del conocimiento y del análisis de algunos modelos de balance social, que se han aplicado a las grandes empresas, lo que condujo a la construcción de un nuevo conocimiento, dirigido a formular un modelo de diagnóstico y de evaluación del BS de la Mipymes, acompañado de un plan estratégico de RSE.

El diseño muestral, se estructuró a partir de una de una población finita de 1020 Mipymes, que funcionan en la localidad de Usaquén. El tipo de muestreo aplicado fue completamente aleatorio, lo que garantizó que cada una de las empresas seleccionadas en la muestra tenga la misma probabilidad de hacer parte de ella (Tabla 1).

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se diseñó el modelo de diagnóstico, de evaluación y de seguimiento de BS para las Mipymes (Tabla 2), el cual, permitirá cualificar y cuantificar las buenas prácticas empresariales diagnosticadas y evaluadas, a través de indicadores de desempeño laboral, social, ambiental.

Tabla 1. Ficha técnica para el diseño muestral de Mypimes, tomadas como unidad de análisis.

Indicador	Plan de muestreo: descripción	Valor y/o criterio sobre el cual se hizo el cálculo del tamaño de la muestra
Población objetivo	Total de empresas tomadas como unidad de análisis en Usaquén	No. 1020
Marco muestral	Listado de Mypimes existentes en la localidad de Usaquén. Es aleatorio por cuanto su selección se ha realizado al azar y cada empresa tenía la misma probabilidad de ser seleccionada en la muestra	Muestreo aleatorio para poblaciones finitas
Grado de confiabilidad	Demuestra que las estimaciones obtenidas de la muestra seleccionada se encuentran, como máximo, a una distancia de 10% de la verdadera media poblacional	Z= 90%
Variabilidad de la población	Describe la variabilidad encontrada en el total de Mypimes de la localidad	S=016
Precisión	El error absoluto máximo admisible en la estimación de la media	$\delta = 0.06$
Tamaño de muestra: N=	$\frac{(Z^2 \cdot S^2) / \delta^2}{(1 + 1/N (Z^2 \cdot S^2) / \delta^2)}$	

La estructura del modelo, se configuró a partir del realizado por FUNDES (2005), acerca de la situación de la RSE y el BS de las Mypimes, para el caso chileno y de la identificación de peculiaridades extraídas de las organizaciones tomadas en el estudio. Es importante destacar que la estructura básica de este modelo busca considerar criterios que puedan ser aplicados a cualquier tipo de Mypime, independiente de su tamaño o su actividad económica. La secuencia recomendada utiliza un formato en el que se resaltan factores de orden social, ambiental y laboral, sustentados por indicadores cuantitativos y cualitativos, que garantizan la integralidad, el encadenamiento lógico y la facilidad para la comparación y la realización de benchmarking entre las empresas.

La aplicación del BS implicará una visión distinta de la empresa, un cambio en la forma de enfocar los objetivos y una perspectiva no tradicional en cuanto a su función social (Fernández *et al.* 1996). De ahí, la importancia que la empresa lleve, previamente, algunos requisitos para facilitar el proceso de cambio, como: existencia de una filosofía social relacionada con los valores organizacionales; conocimiento y convencimiento por parte de la Gerencia o Alta Dirección sobre lo que es el BS; existencia del BS dentro de la estrategia corporativa integral y clarificación o estructuración de la política social de la compañía, de tal manera que le permita definir los objetivos que se pretenden alcanzar.

De otra parte, es necesario identificar las siguientes etapas para su implementación: definir el área o la división responsable para coordinar el proceso de BS; proceder con la capacitación o entrenamiento al coordinador del programa o al equipo de trabajo; establecer un equipo interdisciplinario, encargado de ejecutar el BS; capacitar y homologar el nivel de conocimientos; identificar y definir los indicadores que se van a medir y adecuar el modelo a las características propias de la empresa. Una vez se tiene sistematizada y analizada la información, se organiza en el cuadro de balance, para cuantificar y ponderar los resultados sociales de la organización; se presenta y socializa a la gerencia y a todos los estamentos de la empresa y se aplica la respectiva evaluación del proceso, que permite la retroalimentación y la fijación de metas para el próximo período.

De igual manera y dentro del proceso de implementación del BS, se deben seguir los siguientes pasos:

1. Convocatoria a los stakeholders, para participar en el proceso, que deberá estar a cargo de la unidad que oriente el proceso de RS en la empresa.
2. Presentación de la Empresa, en la que se indique la razón social, Misión y Visión, objeto social.
3. Estructuras que conforman la empresa: legal, en la que se indique el tipo de empresa o sociedad; técnica y productiva, para identificar el tamaño de la empresa; administrativa, con la determinación del organigrama,

Tabla 2. Indicadores del modelo de diagnóstico, de evaluación y de seguimiento de BS.

INDICADORES CUANTITATIVOS	INDICADORES CUALITATIVOS
<p><b>Indicadores de gestión social interno</b> <b>Accionistas o socios:</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Distribución de dividendos expresado en Valor Absoluto (V/A) y en Valor Relativo (V/R):               <ol style="list-style-type: none"> <li>1.1 Porcentaje de distribución de dividendos destinado a apoyar los programas de RS</li> </ol> </li> <li>2. Variación del patrimonio neto por período, expresado en (V/A) y en (V/R):               <ol style="list-style-type: none"> <li>2.1 Crecimiento de la empresa derivado de la implementación de políticas y programas de RSE</li> </ol> </li> </ol>	<p><b>Indicadores de gestión social interno</b> <b>Accionistas o socios:</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Toma de decisiones que apoyan la gestión de RS, calificado en gradación (A: alto, M: medio, B: bajo):               <ol style="list-style-type: none"> <li>1.1 Gestión social interna</li> <li>1.2 Gestión social externa</li> <li>1.3 Gestión ambiental</li> </ol> </li> <li>2. Participación de los socios o accionistas en programas de RSE, calificado en gradación (A, M, B)</li> <li>3. Grado de satisfacción de accionistas, generado por la implementación de prácticas empresariales, calificado en gradación (A, M, B)</li> </ol>
INDICADORES CUANTITATIVOS	INDICADORES CUALITATIVOS
<p><b>Indicadores de gestión social interno</b> <b>Trabajadores:</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Perfil:               <ol style="list-style-type: none"> <li>1.1 Número de trabajadores expresado en (V/A) y en (V/R):                   <ol style="list-style-type: none"> <li>1.1.1 Hombres</li> <li>1.1.2 Mujeres</li> <li>1.1.3 Mujeres en cargos directivos</li> <li>1.1.4 Ingreso de personal</li> <li>1.1.5 Despidos y renunciaciones</li> </ol> </li> <li>1.2 Nivel de escolaridad expresado en (V/A) y (V/R):                   <ol style="list-style-type: none"> <li>1.2.1 Primaria</li> <li>1.2.2 Bachillerato</li> <li>1.2.3 Universitario</li> <li>1.2.4 Postgrado.</li> </ol> </li> <li>1.3 Promedio de antigüedad expresado en (V/A) y (V/R):</li> <li>1.4 Estratificación de edades por rangos expresado en (V/A) y en (V/R)</li> <li>1.5 Promoción de cargos expresado en (V/A) y en (V/R)</li> </ol> </li> <li>2. Sueldos:               <ol style="list-style-type: none"> <li>2.1 Escala salarial expresado en (V/A) y en (V/R)</li> <li>2.2 Comparativo salarial respecto a:                   <ol style="list-style-type: none"> <li>2.2.1 Otras empresas del sector expresado en (V/A) y (V/R)</li> <li>2.2.2 La política salarial estatal expresado en (V/A) y en (V/R)</li> <li>2.2.3 Bonificación e incentivos expresado en (V/A) y en (V/R).</li> </ol> </li> </ol> </li> <li>3. Beneficios complementarios:               <ol style="list-style-type: none"> <li>3.1 Rubro destinado a la alimentación expresado en (V/A) y en (V/R)</li> <li>3.2 Rubro destinado a la educación y a la capacitación expresado en (V/A) y en (V/R)</li> <li>3.3 Rubros complementarios adicionales de salud y seguros expresado en (V/A) y en (V/R)</li> </ol> </li> <li>4. Seguridad ocupacional:               <ol style="list-style-type: none"> <li>4.1 Accidentes de trabajo expresado en (V/A) y en (V/R)</li> <li>4.2 Rubro destinado a salud y seguridad ocupacional expresado en (V/A) y en (V/R)</li> </ol> </li> </ol>	<p><b>Indicadores de gestión social</b> <b>Trabajadores:</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Descripción de la participación en la gestión de la empresa, calificado en gradación (A, M, B):               <ol style="list-style-type: none"> <li>1.1 Asambleas</li> <li>1.2 Comités</li> <li>1.3 Otros estamentos de participación y/o decisión</li> </ol> </li> <li>2. Nivel de satisfacción interna, calificado en gradación (A, M, B):               <ol style="list-style-type: none"> <li>2.1 capacitación y actualización</li> <li>2.2 retención de empleados</li> <li>2.3 preparación para la jubilación</li> </ol> </li> <li>3. Inversiones para el desarrollo del trabajador, calificado en gradación (A, M, B) :               <ol style="list-style-type: none"> <li>3.1 Auxilio para los hijos de trabajadores</li> <li>3.2 Actividades lúdico-culturales para el trabajador y la familia</li> <li>3.3 Auxilio de vivienda</li> <li>3.4 Compensación por resultados</li> </ol> </li> <li>4. Nivel de satisfacción interna para el desarrollo de las funciones, calificado en gradación (A, M,B):               <ol style="list-style-type: none"> <li>4.1 Campañas de seguridad y participación en comités y programas de salud ocupacional</li> </ol> </li> </ol>

Continuación tabla 2

INDICADORES CUANTITATIVOS	INDICADORES CUALITATIVOS
<p><b>Indicadores de gestión social y ambiental</b>  <b>Proveedores:</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>Número de proveedores expresado en (V/A) y en (V/R).</li> <li>Número de proveedores que cumplen con estándares de calidad y aplicación de normas ambientales expresado en (V/A) y en (V/R).</li> <li>Promedio de antigüedad en su relación contractual con la empresa.</li> </ol>	<p><b>Indicadores de gestión social y ambiental</b>  <b>Proveedores:</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>Existen programas y políticas de desarrollo, dirigidas a proveedores locales. ¿Cuáles?</li> <li>Existen programas y políticas para la selección de proveedores, de acuerdo con los parámetros de RS y ambiental. ¿Cuáles?</li> <li>Monitorea el cumplimiento de criterios de calidad en materias primas. calificado en gradación (A, M, B)</li> </ol>

INDICADORES CUANTITATIVOS	INDICADORES CUALITATIVOS
<p><b>Indicadores de gestión social externo</b>  <b>Consumidores/ clientes:</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>Número total de llamadas atendidas en Call Center expresado en (V/A) y en (V/R)</li> <li>Número de reclamos atendidos, expresado en (V/A) y en (V/R)</li> <li>Cantidad de innovaciones, mejoras implementadas en el servicio de atención al cliente expresado en (V/A) y en (V/R)</li> <li>Número de investigaciones dirigidas a estimar la satisfacción del cliente, respecto de sus productos y servicios, expresadas en (V/A) y en (V/R)</li> <li>Número de asesorías al momento de la compra, expresadas en (V/A) y en (V/R)</li> <li>Número de solicitudes y de respuestas efectivas en el servicio de postventa expresados en (V/A) y en (V/R).</li> <li>Número de cursos de capacitación dirigidos a los trabajadores que atienden al cliente expresado en (V/A) y en (V/R).</li> </ol>	<p><b>Indicadores de gestión social externo</b>  <b>Consumidores/ clientes:</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>Existencia de información dirigida al público consumidor, calificado en gradación (A, M, B), sobre:             <ol style="list-style-type: none"> <li>Riesgos producidos por el producto/ servicio</li> <li>Ventajas y desventajas del producto/servicio</li> <li>Composición física y específica del producto</li> <li>Existencia de normativa de la empresa, sobre información contenida en rótulos, envases y otros materiales</li> <li>Valores agregados</li> <li>Existencia de programas y políticas de fidelización de clientes, calificado en gradación (A, M, B)</li> <li>Existencia de programas de mejoramiento continuo de productos, derivado de los reclamos en Call Center, calificado en gradación (A, M, B).</li> <li>Establecimiento de políticas de atención y seguimiento al cliente, según perfiles, calificado en gradación (A, M, B).</li> </ol> </li> </ol>

INDICADORES CUANTITATIVOS	INDICADORES CUALITATIVOS
<p><b>Indicadores de gestión social externo y ambiental</b>  <b>Comunidad:</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>Número de respuestas a las demandas y reclamos de la comunidad por impactos causados en las operaciones empresariales, expresados en (V/A) y en (V/R).             <ol style="list-style-type: none"> <li>Número de voluntarios de la empresa que apoyan la comunidad en su expectativas y necesidades, expresado en (V/A) y en (V/R)</li> <li>Presupuesto destinado a los programas sociales expresado en (V/A) y en (V/R)</li> <li>Número de programas de inversión social expresados en (V/A) y en (V/R)</li> <li>Valor de las donaciones de bienes y/o servicios expresadas en (V/A) y en Valor (V/R)</li> </ol> </li> </ol> <p><b>Medio ambiente:</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>Consumo anual de: agua, energía, combustibles, expresado en (V/A)             <ol style="list-style-type: none"> <li>Inversión en programas de recuperación ambiental expresado en (V/A) y en (V/R).</li> <li>Número de premios y certificaciones obtenidos por la gestión ambiental expresado en (V/A) y en (V/R).</li> </ol> </li> </ol>	<p><b>Indicadores de gestión social externo y ambiental</b>  <b>Comunidad:</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>Existencia de programas y políticas de servicio social, calificado en gradación (A, M, B).             <ol style="list-style-type: none"> <li>Existencia de mecanismos de evaluación del impacto de la Empresa en la comunidad y el entorno, calificado en gradación (A, M, B).</li> <li>Existencia de estrategias de comunicación con la comunidad, calificado en gradación (A, M, B).</li> </ol> </li> </ol> <p><b>Medio ambiente:</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>Descripción de los principales impactos ecológicos             <ol style="list-style-type: none"> <li>Existencia de programas, políticas, infraestructura, calificado en gradación (A, M, B):                 <ol style="list-style-type: none"> <li>Manejo de residuos</li> <li>Gestión del agua</li> <li>Reciclaje</li> <li>Reforestación</li> <li>Innovación de productos destinados a reducir el impacto ambiental</li> </ol> </li> <li>Existencia de programas de educación a los trabajadores sobre medio ambiente, calificado en gradación (A, M, B)</li> </ol> </li> </ol>

Continuación tabla 2

INDICADORES CUANTITATIVOS	INDICADORES CUALITATIVOS
<b>Indicadores gestión externa</b> <b>Estado:</b> 1. Pago de impuestos por la gestión, expresado en (V/A) y en (V/R). a. Pago para el aporte de seguridad social, aportes parafiscales, expresado en (V/A) y en (V/R).	<b>Indicadores gestión externa</b> <b>Estado:</b> 1. Existencia de políticas para prevenir y evitar las prácticas de corrupción y soborno, calificado en gradación (A, M, B)

el manual de funciones y el número de empleados; financiera, para el análisis de ingresos y de egresos conciliables, con los estados contables; comercial, para la determinación de los productos y/o servicios, marcas registradas, perfil de los consumidores.

4. Contextualización de la Empresa en el sector de la economía: naturaleza de los mercados donde actúa, cambios significativos en el tamaño, estructura durante el período anterior.
5. Indicadores de diagnóstico, de evaluación y de seguimiento de BS.

Los indicadores de gestión (Tabla 2) buscan determinar el desempeño e impacto de las actividades empresariales en relación con trabajadores, proveedores, consumidores, comunidad, Estado, accionistas o socios. La claridad y la transparencia de estos indicadores, se constituyen en un elemento de diferenciación y de ventaja competitiva de la Mypime.

Se aclara que, el Valor absoluto (V/A) es útil determinarlo, debido a que su distribución y utilización se revierte entre los diferentes grupos de interés, así: entre los trabajadores, a través de su remuneración salarial y pago de seguridad social y demás incentivos extralegales; el Estado, por la recaudación de impuestos; los propietarios o accionistas, en razón a la distribución de utilidades y capitalización; la comunidad, por las inversiones o donaciones recibidas y conducentes a su desarrollo social; los proveedores, por el pago de insumos o materias primas adquiridas por la Empresa y para el desarrollo de su operación.

Con la presentación de los estados de BS, se podrá hacer el seguimiento, mediante los indicadores de desempeño anotados, de tal manera que se pueda formular un plan estratégico de RSE. Por otro lado, la formulación del plan estratégico es un producto derivado del proceso investigativo, en el cual, a través de la identificación de los factores y las acciones que permiten las buenas prácticas empresariales contempladas en el BS, deberá ser la meta principal de estas organizaciones, ya que establece las directrices de gestión, que garantizarán su cabal funcionamiento.

El diseño de plan estratégico partió de la definición de objetivos, que deberán ser concordantes con las líneas estratégicas de gestión empresarial en términos de responsabilidad social y con el presupuesto establecido para tal fin.

Se definieron como objetivos del plan estratégico de RSE, los siguientes: la utilización óptima de los recursos naturales, con el propósito de minimizar el impacto ambiental; el establecimiento de mecanismos de comunicación y de confianza dirigido a los socios o accionistas, para garantizar un proceso transparente; la implementación de estrategias y de acciones de bienestar orientadas al trabajador, para motivar y favorecer la participación del recurso humano en el mejoramiento continuo de la empresa; el fomento y sistematización de canales de diálogo con el consumidor, con el fin de estrechar la relación y promover la satisfacción y la comunicación; el compromiso extensivo de los proveedores y las empresas subcontratistas, a fin de lograr una integración vertical y horizontal; involucrar a la comunidad en el ámbito local, regional, nacional, en proyectos y en acciones propios de la RSE; el fomento y la sistematización de canales de diálogo con los stakeholders, con el propósito de lograr un proceso de retroalimentación que dé a conocer las acciones de RSE implementadas por las Mypimes; el diseño y operacionalización de mecanismos de evaluación y de seguimiento, para la ejecución del Plan Estratégico de RSE, con la finalidad de garantizar su control (Tabla 3).

Para que el Plan Estratégico de RSE logre sus metas, se hace indispensable enfatizar en los siguientes aspectos: la capacitación es una necesidad insoslayable en las Mypimes; en tal sentido, se debe trabajar por educar y por concientizar en una cultura sobre el tema que poco a poco penetre como un nuevo paradigma. La formación y la creación de una cultura en RS, se debe hacer con planes, con acciones y con tareas integradas, no aisladas con el compromiso desde las autoridades máximas y extenderse por toda la organización y los grupos de interés relacionados. Cada acción definida en las líneas estratégicas, deberá indicar con claridad qué se debe hacer, cómo hacerlo y para qué hacerlo, definiendo con precisión los recursos físicos, humanos, tecnológicos y presupuestales.

Tabla 3. Plan estratégico de RSE.

ÁMBITO	LÍNEA ESTRATÉGICA: MINIMIZACIÓN DEL IMPACTO AMBIENTAL
Particular de la Mypime a nivel interno	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Identificar y evaluar los principales impactos ambientales de la actividad</li> <li>2. Establecer mecanismos de mejora para reducir los impactos ambientales de la actividad</li> <li>3. Disponer de un registro de legislación ambiental</li> <li>4. Llevar un control sistemático del consumo de agua y de energía y de la producción de residuos</li> <li>5. Depositar los residuos adecuadamente</li> <li>6. Optimizar el consumo de energía</li> </ol>
Particular de la Mypime a nivel externo	<ol style="list-style-type: none"> <li>7. Apoyar, gestionar y/o difundir la diversidad forestal y paisajista del entorno</li> <li>8. Contribuir con la recolección de aguas residuales y asegurar el manejo derivado de la actividad empresarial</li> <li>9. Realizar diagnósticos energéticos en las instalaciones</li> </ol>
Complementarios	<ol style="list-style-type: none"> <li>10. Asegurar niveles óptimos de calidad del aire.</li> <li>11. Facilitar y controlar el aparcamiento de carros y motos</li> <li>12. Seguir las normas ISO pertinentes a la conservación del medio ambiente.</li> <li>13. Involucrar a clientes y proveedores en la gestión respetuosa del medio ambiente.</li> </ol>
ÁMBITO	LÍNEA ESTRATÉGICA: GARANTIZAR LA TRANSPARENCIA CON SOCIOS O ACCIONISTAS
Gubernamental	Cumplir con las normas e instrumentos de política fiscal definidos por el Estado
Organizacional	<p>Garantizar una comunicación bidireccional con los socios o accionistas</p> <p>Disponer de un sistema de evaluación, aplicación y seguimiento de las opiniones de las comunidades y demandas de los accionistas</p>
ÁMBITO	LÍNEA ESTRATÉGICA: ASEGURAR LA PERTINENCIA Y MOTIVACIÓN DE LOS TRABAJADORES EN LA MEJORA CONTINUA DE LA EMPRESA
General y particular de los trabajadores	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Asegurar las medidas básicas de salud, seguridad y prevención de riesgos</li> <li>2. Elaborar un código ético para el trabajador</li> <li>3. Valorar las necesidades formativas de capacitación y actualización del trabajador. En consecuencia, elaborar y desarrollar un plan de formación anual que incluya el tema de RSE</li> <li>4. Asegurar la contratación de personal femenino e incrementar su representación a nivel de todos los estamentos organizacionales</li> <li>5. Contratar y cualificar personal con discapacidad</li> <li>6. Capacitar continua y permanentemente en RSE</li> <li>7. Desarrollar un sistema para incentivar la participación del trabajador</li> <li>8. Garantizar la coherencia y la igualdad de oportunidades y la no discriminación</li> <li>9. Velar por la estabilidad de los trabajadores</li> <li>10. Evaluar de manera permanente y continua el grado de satisfacción de los trabajadores</li> <li>11. Aplicar medidas ergonómicas para garantizar la salud ocupacional de los trabajadores</li> <li>12. Fomentar las buenas prácticas</li> <li>13. Aplicar e implementar lo establecido por las normas ISO</li> </ol>

Continuación tabla 3

ÁMBITO	LÍNEA ESTRATÉGICA: ESTRECHA RELACIÓN CON EL CLIENTE PARA GARANTIZAR SU SATISFACCIÓN
General de la Mypime en el contexto	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Evaluar el grado de satisfacción del cliente, de manera continua y permanente</li> <li>2. Comunicar clara y transparentemente, toda la información relativa al producto o servicio que se ofrece</li> </ol>
Particular de la Mypime	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Establecer requerimientos ambientales y sociales de interés para los clientes y llevar control de su cumplimiento</li> </ol>

ÁMBITO	LÍNEA ESTRATÉGICA: COMPROMISO DE LA RSE A LOS PROVEEDORES
General de la Mypime	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Homologar los productos de compra, según criterios ambientales y sociales</li> <li>2. Introducir normas y requisitos de calidad, según criterios definidos y establecidos en las cláusulas contractuales o acuerdos comerciales</li> <li>3. Establecer un sistema de evaluación de proveedores, según criterios establecidos en el punto anterior</li> <li>4. Desarrollar un sistema de comunicación efectivo</li> </ol>

ÁMBITO	LÍNEA ESTRATÉGICA: IMPLICARSE CON LA COMUNIDAD Y EL TEJIDO SOCIAL
General de la Mypime	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Desarrollar un sistema de comunicación para mejorar el diálogo con la comunidad</li> <li>2. Ser miembro activo de las asociaciones y colectivos próximos</li> <li>3. Identificar las necesidades apremiantes del entorno</li> <li>4. Elaborar un plan estratégico de promoción social y ambiental</li> </ol>

ÁMBITO	LÍNEA ESTRATÉGICA: FOMENTAR Y SISTEMATIZAR LOS CANALES DE DIÁLOGO CON LOS STAKEHOLDERS
General en la Mypime	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Desarrollar un plan de comunicación, para dar a conocer el plan estratégico de RS a todos los interesados, para que contribuyan con su implementación</li> <li>2. Garantizar un interlocutor válido en los diferentes grupos de interés</li> <li>3. Sistematizar las relaciones internas de comunicación</li> <li>4. Ampliar la información relativa a las acciones de RS</li> <li>5. Crear canales de comunicación bidireccionales específicos con los trabajadores</li> <li>6. Establecer un programa de actividades extralaborales para los trabajadores</li> <li>7. Disponer de un sistema para recoger consultas y sugerencias de los clientes, así como mecanismos de respuesta, seguimiento y registros</li> <li>8. Crear un grupo de trabajo para fomentar el diálogo entre los trabajadores</li> <li>9. Crear incentivos para fomentar el diálogo</li> </ol>

ÁMBITO:	LÍNEA ESTRATÉGICA: GARANTIZAR EL CONTROL Y SEGUIMIENTO DE LA IMPLANTACIÓN DEL PLAN ESTRATÉGICO DE RS
General en la Mypime	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Establecer la unidad de RS, como órgano de coordinación y seguimiento del plan estratégico de RS</li> <li>2. Asignar un responsable dinamizador del plan estratégico</li> </ol>

Los resultados obtenidos fueron contrastados con el adelantado por la Fundación para el Desarrollo Sostenible (FUNDES, 2005), hallando similitudes. En esta investigación, el 75% de las mipymes encuestadas no conocen de la existencia del BS, ni de su utilidad; en el caso chileno, sólo el 10% de las empresas encuestadas cuenta con un BS. En los dos estudios, se identificaron las razones por las cuales las Mypimes no desarrollan actividades de RSE y elaboración de BS, como: carencia de recursos financieros destinados para la actividad; ausencia de apoyo del sector público, que no se traduce en beneficios para abordar la RS e implementación del BS y omisión en la Misión de las empresas, para desarrollar prácticas de RSE.

Por último, en los dos estudios, se identifica el concepto de RSE con bienestar de los trabajadores, acciones dirigidas a la preservación del ambiente y al mejoramiento de la calidad de vida de la comunidad.

Conflicto de intereses: El manuscrito fue preparado y revisado con la participación de todos los autores, quienes declaramos que no existe ningún conflicto de intereses que ponga en riesgo la validez de los resultados presentados. Financiación: Este estudio fue financiado por la Universidad de Ciencias Aplicadas y Ambientales U.D.C.A.

## BIBLIOGRAFÍA

1. FERNÁNDEZ V., M.; GALLEGO, M. 1996. Balance Social: fundamentos e implementación. Ed. UPB (Colombia).143p.
2. FUNDACIÓN PARA EL DESARROLLO SOSTENIBLE FUNDES. 2005. Situación de la responsabilidad social de la mipyme: el caso chileno. Ed AUSJAL (Chile). 122p.
3. IOANNOU, I.; SERAFEIM, G. 2011. The consequences of mandatory corporate sustainability reporting. Harvard Business School. 45p.
4. LIZCANO, J.L. 2004. ¿Qué es responsabilidad social corporativa? Ed. AECA (España). 226p.
5. LIMA C., E. 2001. Balance Social de la Empresa en América Latina. Ed. ADCE (Brasil). 201p.
6. PERDIGUERO, T. 2005. La responsabilidad social de las empresas y los nuevos desafíos de la gestión empresarial. Ed. Universidad de Valencia (España). 230p.
7. PIÑEROS E., R. 2007. Medición diagnóstica de la ética y de la responsabilidad social empresarial como factores de perdurabilidad. Rev. Universidad & Empresa (Colombia). 12:225-260.
8. PINTO, J. 2006. Objetivos del Milenio y la Responsabilidad Social de las Pymes: una metodología de evaluación. Ed. Fundación Konrad Adenauer (Colombia) 108p.
9. THEVENET, M. 2002. Auditoría de la Cultura Empresarial. Ediciones Díaz de Santos, S.A España. 194p.
10. YEPES LÓPEZ, G. 2007. La responsabilidad social empresarial: fundamentos y aplicación en las organizaciones de hoy. 1ª ed. Bogotá. Universidad Externado de Colombia. 248p.

Recibido: Noviembre 29 de 2011

Aceptado: Octubre 18 de 2011