

USOS POTENCIALES DE LOS ÁCIDOS GRASOS VOLÁTILES EN SUELO, AGUA Y AIRE

Potential Uses of Volatile Fatty Acids in Soil, Water and Air

José Alfredo Samaniego G.^{1*} y Aurelio Pedroza-Sandoval¹

RESUMEN

Los ácidos grasos volátiles (AGVs) tienen propiedades biocidas, biostáticas o tóxicas para microorganismos, plantas y animales, lo que depende de su forma química y su concentración. Los AGVs se encuentran en suelo, agua y aire, donde podrían producirse y utilizarse. Los ácidos acético, fórmico y propiónico se usan para conservar alimentos preparados, fumigar frutos y verduras, disminuir o eliminar bacterias coliformes de leche de cabra o calostro de vacas. En el suelo, los AGVs pueden eliminar hongos y bacterias que atacan raíces de plantas. Los residuos de plantas o basura al descomponerse pueden generar AGVs, los cuales se pueden usar para producir alcohol o metano. El presente estudio tuvo como objetivo discutir la química, la forma en la que actúan, usos actuales y aplicaciones potenciales de los AGVs.

Palabras clave: antimicrobianos, fumigación.

SUMMARY

Volatile fatty acids (VFAs) have biocide, biostatic or toxic effects on microorganisms, plants and animals, depending on their chemical formula and concentration. VFAs are found in soil, water or air, where they can be produced and used. Acetic, formic and propionic acids can be used to preserve food, to fumigate fruit and vegetable, and even reduce or eliminate coliform bacteria from goat's milk or colostrum of cows. In soil, VFAs could eliminate fungus and bacteria that attack plant roots. Residues of plants or decomposed wastes can

generate VFAs, which can be used to produce ethanol or methane. In this study each VFA is discussed in terms of its chemistry, manner of action, uses and potential applications.

Index words: antimicrobial, fumigation.

INTRODUCCIÓN

En México se tuvo una modesta generación de patentes entre 1994 y 2008 con un promedio anual de menos de 500 solicitudes; mientras que en el mismo periodo, otros países alcanzaron cientos de miles (WIPO, 2009). La principal razón de lo anterior, fue un modesto presupuesto asignado a la ciencia y tecnología ~ 0.4% del PIB (WIPO, 2009). Sin embargo, en México, se podrían desarrollar tecnologías de bajo costo, utilidad práctica y fácil adopción. Particularmente, para el control o manejo de organismos perjudiciales para el hombre, que aún hoy limitan la producción y conservación de productos agropecuarios e impactan la salud humana y animal. Al mismo tiempo, es necesario reutilizar residuos animales y vegetales, descontaminar suelos y aguas y generar ambientes estériles. Para todo ello, los ácidos grasos volátiles de hasta seis carbonos (AGVs) son compuestos potencialmente útiles.

Los AGVs se encuentran en una amplia gama de ambientes, lo que puede permitir su uso. Algunos de ellos son: el suelo (Fujii *et al.*, 2010); agua contaminada con efluentes de fábricas de explosivos (Singh *et al.*, 2009); las nubes, donde se genera ácido fórmico en concentración de nanomoles (Stavrou *et al.*, 2012); y exudados de raíces de plantas (Kai *et al.*, 2011) entre otros. El ácido acético (AA) presente en el vinagre se ha utilizado por siglos para conservar alimentos (Escabeche, 2013); así mismo, el AA presente en la vagina de la mujer se asoció con un incremento en la absorción de fármacos (Lee *et al.*, 2011). Algunas tecnologías a desarrollarse con los AGVs podrían llegar a ser más económicas, de uso práctico y sustentable, pero por razones de diferente índole, no se han promovido ni abordado.

¹ Campo Experimental La Laguna. INIFAP. Blvd. José Santos Valdez 1200 pte., Col. Centro. 27440 Matamoros, Coahuila, México.

* Autor responsable (samaniego.jose@inifap.gob.mx)

² Universidad Autónoma Chapingo. Unidad Zonas Áridas. 56230 Chapingo, Estado de México.

Recibido: mayo de 2012. Aceptado: mayo de 2013.

Publicado como revisión en

Terra Latinoamericana 31: 155-163.

Los objetivos de este trabajo fueron: i) mostrar los principios químicos que ayuden a entender el comportamiento de los AGVs, y ii) discutir usos, tecnologías e innovaciones potenciales a partir de AGVs.

Relación entre el pH Y pK_a de los AGVs

Las dos formas en que se encuentran los AGVs en solución son disociada y no disociada. El pK_a propio de cada uno de estos ácidos, indica su constante de disociación en donde ambas formas disociada –no disociada se encuentran en 50%. Por ejemplo, el pK_a del ácido acético es de 4.75 que se puede expresar como $-\log_{10}(4.75)$ o bien como $1/10^{(4.75)}$ cuyo resultado es $1.75 \times 10^{-5} \text{ mol L}^{-1}$. Conforme el pH en una solución disminuye por debajo del pK_a de cada ácido, la forma no disociada de los ácidos aumenta. Para estimar la concentración molar o mili molar de los AGV en algunas de sus dos formas, se necesitan los valores de su pK_a , el pH de la solución en donde están contenidos y la concentración total de los ácidos añadidos o generados en esa solución.

Los pK_a de los AGV acético (AA), isobutírico (AiB o AB), n-butírico (AnB), capríco (AC), fórmico (AF), propiónico (AP), isovalérico (AiV) y n-valérico (AnV) son 4.75, 4.84, 4.81, 4.83, 3.75, 4.87, 4.77 y 4.82, respectivamente (Tenuta *et al.*, 2002). Entonces, el cálculo de los ácidos en su forma no disociada se describe por la siguiente fórmula:

$$\text{mmol AGV nd} = \frac{\text{mmol}(\text{AGV d} + \text{AGV nd})}{\frac{10^{(-pK_a)}}{10^{(-pH)}}} + 1 \quad (1)$$

En donde mmol AGV d y AGV nd indican milimoles de ácidos en forma disociada y no disociada, respectivamente (total de ácidos en solución); y pK_a y pH son la constante de disociación del ácido y pH de la solución que contiene el ácido respectivamente. El cálculo automático de AGV nd se puede hacer utilizando la hoja de cálculo de Excel, con la siguiente fórmula: = ((celda con el valor total del ácido graso volátil) / (10^{-pK_a} del ácido graso volátil/ 10^{-pH} de la solución donde está contenido el ácido+1)). La fórmula se puede utilizar para calcular los mmol L^{-1} nd de cada AGV contenidos en una mezcla, solo se requiere el pH de la solución y la concentración de cada ácido.

Si bien, los AGVs son potencialmente tóxicos en sus dos formas, la toxicidad es mucho mayor conforme el pH toma valores de 3 a 4, donde los AGVs se encontrarán de 85 a 99% en forma no disociada. De tal manera que, para tener una misma cantidad de un AGV en forma no disociada se requiere menos de 175 veces a pH 3 que a pH 7, como se muestra en la Figura 1. Por tanto, la toxicidad de los AGV está dada principalmente por la forma no disociada (Tenuta *et al.*, 2002).

Efectos Usuales de los AGV

Los AGVs pueden tener efecto fungicida-fungistático, bactericida-bacteriostático, nematicida, herbicida, fumigante o ser tóxicos para plantas e inducir muerte por apoptosis en células de diferentes microorganismos e incluso en células cancerosas (Hu *et al.*, 2011). También pueden ser metabolizados por múltiples organismos o pueden ser precursores para formar metano u otros biocombustibles (Jin e Heiji, 2009). Los efectos de los AGV sobre los organismos dependen y varían de acuerdo al ácido, a su concentración, al pH del medio en el que se encuentren, si están en forma líquida o como gas, a la temperatura, la susceptibilidad del organismo objetivo, la adaptación o resistencia adquirida por los microorganismos y a la interferencia con otras sustancias.

Efectos sobre las plantas. Las plantas y plántulas de los cultivos de arroz, trigo, cebada y otros cereales son afectadas en su crecimiento o establecimiento en presencia de AA, AB y AP a concentraciones de menos de 2 a más de 15 mmol L^{-1} (Marini-Kopp *et al.*, 2007; Shan *et al.*, 2008; Pang *et al.*, 2007). Las plantas acuáticas que constituyen malezas *Hydrilla verticillata*, *Potamogeton nodosus* y *Spartina alterniflora*, son restringidas en su proliferación por AA de 38 a 250 mmol L^{-1} (Anderson, 2007). Los AA y AF permiten la entrada y acumulación de cadmio (Cd) en las raíces de las plantas, sin afectar su crecimiento en algunas de ellas (Sun *et al.*, 2011). Los bosques boreales y tropicales inducen la formación del 90% de AF en la atmósfera (Stavrakou *et al.*, 2012).

Como intermediarios en la producción de energía. Algunos AGVs son los principales insumos para las bacterias metanógenas aunque el AF es tóxico para estas bacterias, los AP y AB son comúnmente convertidos a AA, el cual es utilizado por las bacterias para formar metano. Los estiércoles fermentados son una fuente

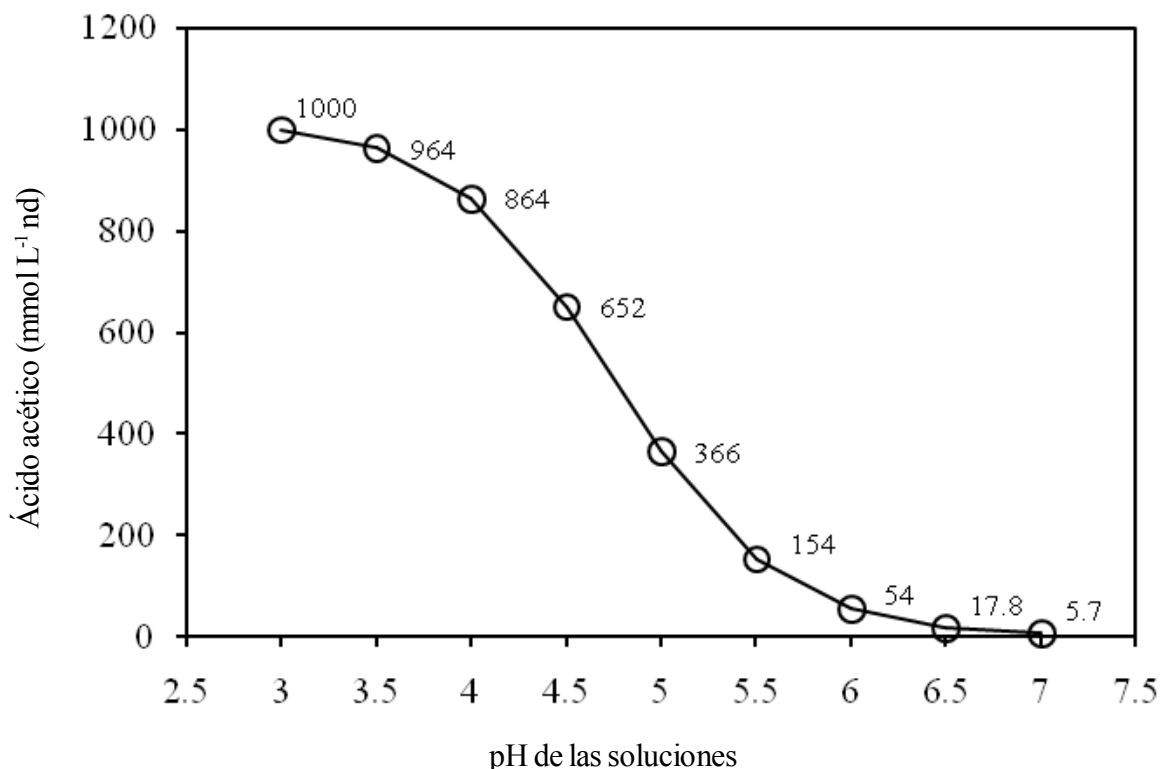


Figura 1. Relación entre el pH de las soluciones con los mmol L⁻¹ de ácido acético (AA) en forma no disociada (nd). Iniciando con 1018 mmol L⁻¹ de AA en todas las soluciones. Figura realizada utilizando la fórmula (1).

abundante de AA, que al utilizarse por las bacterias forman metano (Wang y Zhang, 2009). Tanto el pH del medio como las formas disociada -no disociada determinan la formación de metano. De tal forma que, conforme se incrementa la concentración de AGVs, el pH disminuye, y la forma no disociada de los ácidos aumenta e inhibe la actividad de las bacterias metanogénicas en el rumen (Zhou *et al.*, 2011).

Acción contra los organismos fitopatógenos en el suelo. Bacterias, hongos y nemátodos pueden morir por aplicación de AGVs. En el caso del nemátodo *Meloidogyne incognita* murió con 5.7 y 1.5 mmol L⁻¹ nd de AA y AB, respectivamente (Katase *et al.*, 2009). Entretanto, AGVs contenidos en excretas líquidas de cerdo fueron efectivas para el control de los nemátodos *Pratylenchus* spp. (Mahran *et al.*, 2008b). El hongo *Verticillium dahliae* fue muerto por AA, AB, AF, AP a concentraciones de 26.2, 29.0, 3.6 y 27.0 mmol L⁻¹, respectivamente (Tenuta *et al.*, 2002). También murió el hongo *Rhizoctonia solani* al estar en contacto con AA ~ 21 mmol L⁻¹ nd obtenido del líquido del césped procesado con calor (Ushiwata *et al.*, 2009). Una

emulsión de pescado cuyo contenido de AGV fue de ~ 200 mmol L⁻¹ fue letal para *V. dahliae* y *Pythium ultimum* cuando se agregó entre 1 y 4% en arena (Abbasi *et al.* 2009). Entre 17 y 33 mmol L⁻¹ nd de AA y n-butírico (AnB) mataron clamidosporas de especies de *Fusarium oxysporum* y la bacteria *Ralstonia solanacearum* (Momma *et al.*, 2006). El AA también se ha utilizado en forma volátil para controlar en el suelo especies de los géneros de hongos *Fusarium*, *Rhizoctonia* y *Sclerotium* (Abd-El-Kareema, 2009). *Phymatotrichopsis omnivora* es un hongo que ataca a más de 2000 especies de plantas, tanto su micelio como sus esclerocios no fueron viables con AA, AB, AF y AP a 38 µg ml⁻¹ (ácido - aire) o 50 mmol L⁻¹ en solución, respectivamente (Samaniego-Gaxiola y Balagurusamy, 2013).

Muerte de bacterias y hongos patógenos de humanos. De acuerdo a Yossa *et al.*, (2011) el AA a 333 mmol L⁻¹ disminuyó 6 órdenes de magnitud (1×10^6) la población de *Salmonella typhimurium* en el suelo. Según Ryssel *et al.* (2009 y 2011), el AA es un antimicrobiano usado al 3% elimina a *Pseudomonas*

aeruginosa y una gama amplia de bacterias patógenas de humanos, con la posibilidad de aplicarse en tratamientos a personas quemadas para evitar infecciones. *Candida albicans* levadura patógena de humanos, muere en minutos por concentración de AA de 120 a 300 mmol L⁻¹ nd (Ramsdale *et al.*, 2008). En la bacteria *Listeria innocua*, disminuyó su tasa de crecimiento en más del 80 % con 5.1 mmol L⁻¹ nd de AA (George *et al.*, 2008).

Conservadores y desinfectantes de alimentos, desperdicios y productos agrícolas. En fase volátil los AGVs se han utilizado o están asociados con la conservación del contenido de los silos, (Nkosi *et al.*, 2011). Especies de *Aspergillus* que producen micotoxinas y deterioran pistaches almacenados, fueron restringidas cuando se fumigó el fruto una hora con AA al 60% (Nawar, 2008). Como desinfectante de carne se ha utilizado el AA a 166.5 mmol L⁻¹ (Loretz *et al.*, 2011). Frutos en poscosecha como cítricos, tomate, cerezas fueron conservados con AA y AP, al impedir el desarrollo de varios de los hongos que los deterioran (Hassenberg *et al.*, 2010; Sholberg, 2009; Sholberg y Randall, 2007). También se reportó que los AA y AP fueron los únicos en impedir el crecimiento de 65 especies de levaduras obtenidas de alimentos que contienen azúcar (Senses-Ergul *et al.*, 2007). El AA a 83.3 mmol L⁻¹ fue un antiviral efectivo para el virus de Newcastle (Reddy *et al.*, 2010); este mismo ácido combinado con ácido peracético y peróxido de hidrógeno logró eliminar por completo bacterias y hongos patógenos de humanos y animales en instalaciones avícolas (Gehan, 2009). El ácido per fórmico, eliminó casi por completo bacterias patógenas de humanos contenidas en aguas residuales (Gehr *et al.*, 2009). También se ha consignado la disminución de *Escherichia coli* en puré de pepino al adicionarle hasta 500 mmol kg⁻¹ de AA (Lee *et al.*, 2010). Recientemente, se logró eliminar por completo bacterias coliformes del calostro de vacas al bajar el pH a 4 adicionando AF (Collings *et al.*, 2011). Leche de cabra adicionada con 50 mmol L⁻¹ nd de AA redujo la cantidad de bacterias coliformes (Samaniego-Gaxiola *et al.*, 2011).

Mecanismos de Acción de los AGVs

El AA propicia que *Candida albicans* y *Saccharomyces cerevisiae* generan enzimas que destruyen su ADN, se fragmente su célula y finalmente

mueran (muerte por apoptosis) (Ramsdale *et al.*, 2008). La enzima Homoserina O-Succinil transferasa es inhibida por el AA, lo que conlleva a una carencia de síntesis de metionina y la subsecuente muerte de *Escherichia coli* (Giannattasio *et al.*, 2012). Otra forma en la que el AA afecta a *Clostridium thermoaceticum* y *S. cerevisiae* es el cambio de su pH interno y su potencial de membrana lo que induce su muerte (Mills *et al.*, 2009).

Formación e Importancia de los AGVs en Suelo

El proceso que explica lo que ocurre durante la formación de AGVs en el suelo, fue descrito en dos trabajos distintos. En uno, se explican los cambios del suelo inundado cultivado con arroz (Sahrawat, 2008), y en el otro, los cambios del suelo después de adicionar paja de trigo, saturar con agua y cubrirlo con plástico, esto último conocido como desinfección biológica (DBS) o anaerobia del suelo (DAS) (Momma, 2008). Durante la DAS, el oxígeno es consumido al empezar a degradarse la materia orgánica, el pH disminuye a la par que los AGVs aparecen y el potencial óxido-reducción E_h (mv) alcanza valores negativos (-100 a -400 mV), lo que implica una condición de la solución del suelo altamente reducida y anaerobia. Quienes primero obtuvieron evidencias del efecto de los AGVs sobre un hongo fitopatógeno *Fusarium oxysporum* f. sp. *raphani* fueron Okazaki y Nose (1986).

Por tanto, en el suelo, los AGVs parecen estar involucrados directa o indirectamente en la DAS. Directamente los AGVs pueden ser tóxicos hacia organismos fitopatógenos en el suelo; indirectamente estos ácidos pueden descomponerse y originar ácido nitroso o amoníaco a pH ácido o alcalino del suelo, respectivamente. Tanto el ácido nitroso como el amoníaco son igualmente tóxicos para los organismos fitopatógenos (Conn *et al.*, 2005; Katase *et al.*, 2009). O bien, los AGVs en el suelo pueden provenir de compuestos como el alcohol que en contacto con el aire formará AA (Momma *et al.*, 2010).

Producción de AGV

En los campos agrícolas, silos y otros sitios podría llegar a requerirse grandes cantidades de AGVs, los cuales pueden generarse descomponiendo residuos de plantas, basura o desperdicios de alimentos, frutas y verduras.

En contraste, el uso de AGVs en cantidades moderadas podría ser suministrado en grado industrial, el costo de AA es barato, alrededor de \$20 por litro (Quiminet, 2013).

Algunos trabajos sugieren que AGVs podrían generarse en el suelo al descomponerse 3.8 y 4 Mg ha⁻¹ de residuos de ballico (*Lolium*) y brócoli, respectivamente (Blok *et al.*, 2000); o bien, degradando 30 Mg ha⁻¹ de residuo de pasto (Messiha *et al.*, 2007). En la solución del suelo, medios líquidos o dentro de los ensilados pueden

producirse y obtenerse grandes cantidades de AGVs. En el Cuadro 1 se exponen algunos ejemplos al respecto.

Usos, Limitantes y Perspectivas de los AGVs

El uso de los AGVs como conservadores de alimentos y productos agrícolas podría extenderse en México, por ejemplo, para conservar tomate, uva, fresa entre otros (Sholberg, 2009). La ventaja de usar AA en los empaques permitiría ahorro de agua e hipoclorito de

Cuadro 1. Ambiente, condiciones y microorganismos involucrados en la producción de AGVs.

Medio	Condiciones	Microorganismos	Ácidos - cantidad	Referencia
Suelo	Paja de trigo 39 Mg ha ⁻¹ descompuesta en suelo húmedo cubierto con plástico a pH de 5 a 6	Bacterias nativas del suelo	AA ~ 32 y AB ~ 25 mmol kg ⁻¹ (ácidos-suelo)	(Momma <i>et al.</i> , 2006)
Suelo	Paja de trigo o arroz con 20 Mg ha ⁻¹ , suelo húmedo cubierto con plástico	Bacterias nativas del suelo	AA 32 y AB 25 mmol L ⁻¹ extracto acuoso del suelo	Kim <i>et al.</i> , 2007
Líquido	Fermentación de desperdicios de comida, pH final < 4.	<i>Lactobacillus plantarum</i>	AA 116 y AP 135 mmol L ⁻¹	(Ye, <i>et al.</i> , 2008)
Líquido	Hidrolizado ácido de ramas < 5 cm y hoja de árbol de olivo	<i>Pichia stipitis</i>	AA 566 y AF 273 mmol L ⁻¹	(Díaz <i>et al.</i> , 2009)
Líquido	Residuos de cereales y frutas, sujetos a temperatura y presión elevadas	Ningún organismo	AA hasta 20% y AF hasta 80%	(Jin e Heiji, 2009)
Líquido (bacterias aisladas de <i>Sedum alfredii</i>)	Medio líquido con 80 mg L ⁻¹ de Cd (CdCO ₃ +(PbCO ₃) ₂ ·Pb(OH) ₂) o Pb (CdCO ₃ +(PbCO ₃) ₂ ·Pb(OH) ₂)	<i>Burkholderia cepacia</i> .	AF 110 mmol L ⁻¹	(Li <i>et al.</i> , 2010)
	Medio líquido con 80 mg L ⁻¹ de (PbCO ₃) ₂ ·Pb(OH) ₂	<i>Microbacterium sepeidae</i> + <i>Enterobacter cancerogenes</i>	AF 140 mmol L ⁻¹	
Líquido	Vinaza del tequila	No intervienen organismos	AGV 2.5-3.4 g L ⁻¹	(Méndez-Acosta <i>et al.</i> , 2010)
Líquido	Excretas líquidas de cerdo	No intervienen organismos	AGV >250 mmol L ⁻¹	(Mahran <i>et al.</i> , 2008a)
Líquido	Encontrado en efluente de fábrica de explosivos (RDX y HMX)	No intervienen organismos	AA 4913 mmol L ⁻¹	(Singh <i>et al.</i> , 2009)
En la materia seca	Ensilado de maíz	<i>Lactobacillus buchneri</i>	AA 659 mmol Kg ⁻¹	Nkosi <i>et al.</i> , 2011

sodio, ya que al combinar los AGVs y el hipoclorito, este último sería más eficiente para desinfectar frutos. El AA puede emplearse en dosis 3-5% donde se considera inocuo (Shafiur, 2007).

El AA podría eliminar algunas plagas al aplicarse en fase gaseosa, el ácido logra matar mosquita blanca y la palomilla del manzano *Bemisiatabasi* y *Cydia pomonella*, respectivamente (Randall *et al.*, 2011; Samaniego-Gaxiola *et al.*, 2012). Aunque en el caso de *B. tabasi*, habría que buscar la aplicación de AA en una forma innovadora, como su posible uso en solución.

El uso de AGVs podría combinarse con otros compuestos para incrementar su efecto letal; aún existe poca información al respecto. Sin embargo, los esclerocios del hongo *P. omnivora* murieron en 20 min al combinar AA o soluciones amortiguadoras que contienen este ácido y 1000 ppm del fungicida Propiconazole (Tilt®), en contraste, con los tres días que se necesitó para matar los esclerocios cuando solo se usó el fungicida; asimismo, *Trichoderma* sp. únicamente pudo atacar y matar a *P. omnivora* en presencia de AA (Samaniego-Gaxiola, 2008).

En alimentos en donde el AA se añadió, se observó una adaptación de las bacterias al ácido (Oh *et al.*, 2009), ello significa un factor potencialmente limitante para el uso de los AGVs. Otros factores que interfieren con la toxicidad de los AGV son: i) el mecanismo de eflujo activo del AA que poseen algunas bacterias tolerantes al ácido (Mills *et al.*, 2009); ii) la asimilación y posterior traslocación o remoción activa del AA (Mollapour y Piper, 2007); iii) la hipertonicidad en el medio, debida a una elevada concentración de NaCl (Chapman y Ross, 2009) y iv) la presencia de metionina en el medio, la cual contrarresta los efectos tóxicos del AA (Mills *et al.*, 2009). Para contrarrestar los factores que limitan la toxicidad de los AGVs hacia los organismos, podrían cambiarse algunas condiciones fisicoquímicas del medio como el potencial E_h y sales, lo cual puede ser posible (Momma *et al.*, 2011).

Recientemente, se analizaron trabajos, en donde se evaluó la efectividad que tiene la materia orgánica incorporada en el suelo para matar hongos que atacan raíces de plantas, ahí se destaca la necesidad de conocer los mecanismos por los que los hongos mueren, pues hay resultados inconsistentes al usar distintos tipos de materia orgánica y su efectividad para matar hongos (Bonanomi *et al.*, 2007). En contraste, en la DAS se consideran a los AGVs como una constante, por ello,

la investigación en este sentido podría redundar en un método más eficiente de uso generalizado, para el control de organismos fitopatógenos en el suelo. Adicionalmente, la DAS se enfoca a disminuir el uso de pesticidas en el suelo (Muramoto *et al.*, 2008; Shennan *et al.*, 2010).

La mayor parte de los suelos de México (principalmente en el norte del país) son alcalinos y limitarían el uso de los AGVs, si bien, la descomposición de carbohidratos y residuos vegetales en el suelo inundado induce la aparición de AGVs y una disminución del pH ~ 6 , además una disminución adicional permanente del pH no es práctica, pues se necesitaría añadir ácido sulfúrico en grandes cantidades en el suelo. No obstante, una vez generados los AGVs en el suelo, al cambiar temporalmente el pH de ~ 6 a ~ 4 hizo que los esclerocios de *P. omnivora* murieran (datos no publicados). La idea de cambiar temporalmente el pH del medio para favorecer que los AGVs incrementen su toxicidad, puede estar acorde con el tiempo en el que los ácidos pueden ser letales hacia los microorganismos. Algunos ejemplos así lo indican: en 15 min 300 mmol L⁻¹ nd de AA mataron más del 95% *C. albicans* (Ramsdale *et al.*, 2008); los esclerocios de *P. omnivora* no sobrevivieron más del 10% al permanecer 15 min con 50 mmol L⁻¹ nd de los ácidos fórmico y propiónico (Samaniego-Gaxiola y Nagamani, 2013).

La eficiencia de los AGVs para matar organismos parece ser elevada. El micelio de *P. omnivora* no sobrevivió a 38 $\mu\text{g/ml}$ de aire con AA, AB, AF o AP (Samaniego-Gaxiola y Nagamani, 2013) cantidad que es menor ($\sim 63 \mu\text{g ml}^{-1}$ de aire) a la reportada para varios hongos fitopatógenos expuestos a una mezcla de 14 compuestos volátiles que se han detectado en el hongo *Muscodor crispans* (Mitchell *et al.*, 2010). No obstante, se reportó que el aceite de orégano fue tan eficiente en matar esclerocios de *Sclerotinia sclerotiorum* que se necesitaron concentraciones menores a $\mu\text{g ml}^{-1}$ (Soylu *et al.*, 2007).

La inundación es una condición que favorece la formación de AGVs, pero niveles cercanos a la inundación también podrían serlo (Shennan *et al.*, 2010); sin embargo, es necesario investigar más profundamente ambos casos para determinar en qué condición de humedad se favorece la mayor generación y eficiencia de AGVs para matar a organismos. Particularmente, las raíces de ciertas variedades de trigo poseen la capacidad de favorecer microbiotas desfavorables para organismos fitopatógenos y favorables para los cultivos

(Mazzola, 2010), ello podría estar relacionado con los exudados de AGVs por las raíces, puesto que se sabe que plantas pueden exudar o acumular AA (Sun *et al.*, 2011).

El pH no solo es determinante para las formas de los AGVs, también regula la biodiversidad de bacterias, explica el predominio de los hongos en suelo ácido y bacterias en suelos alcalinos (Rousk *et al.*, 2010 a y b). Así, el pH es un factor que al poderse manipular ayudaría a combatir microorganismos dañinos de humanos, animales y plantas (Peñalva *et al.*, 2008). Aunque, en el suelo, el pH es dinámico y está influenciado por el suministro de agua, vegetación, temperatura, presencia de sales, entre otros (Zoltán, 2008).

Formas novedosas de utilizar los AGVs podrían involucrar la reutilización de desechos orgánicos producto de las actividades humanas y excretas de animales propios de la actividad pecuaria. Destaca también el uso reciente de los AGVs para el control de plagas de almacén (Randall *et al.*, 2011; Sahrawat, 2008; Zoltán, 2008). Asimismo, cantidades abundantes de AGVs, particularmente AA y AF, podrían producirse en un sistema que acople la degradación de residuos orgánicos y la producción de AGVs (Díaz *et al.*, 2009; Jin e Heiji, 2009) con su utilización como insumo de una cepa *S. cerevisiae* altamente eficiente en la producción de alcohol (Medina *et al.*, 2010), o bien, que el ácido sea utilizado por bacterias metanógenas.

CONCLUSIONES

Los efectos tóxicos de los ácidos grasos volátiles (AGVs) en suelo, agua y aire, los coloca como compuestos útiles para disminuir organismos perjudiciales para las actividades humanas. De tal manera que se podrían restringir microorganismos que contaminan alimentos, fumigar productos vegetales, preservar ensilados, granos y semillas, así como reducir poblaciones de malezas, nemátodos, hongos y bacterias que habitan el suelo y atacan a plantas. Por el costo, el ácido acético es económico y, éste y los otros AGV podrían generarse en grandes cantidades degradando residuos vegetales y animales u obtenerse de excretas de animales. El pH entre 4 a 5 favorecería la toxicidad de los AGVs hacia los organismos objetivo. Investigación concerniente a la fisicoquímica del suelo (pH, E_h , sales) podría aumentar el entendimiento y eficiencia de la aplicación de los AGVs.

LITERATURA CITADA

- Abbasi, P. A., G. Lazarovits, and S. Jabaji-Hare. 2009. Detection of high concentrations of organic acids in fish emulsion and their role in pathogen or disease suppression. *Phytopathology* 99: 274-281.
- Abd-El-Kareema, F. 2009. Effect of acetic acid fumigation on soil-borne fungi and cucumber root rot disease under greenhouse conditions. *Arch. Phytopathol. Plant Protect.* 43: 213-220.
- Anderson, L. W. J. 2007. Potential for sediment-applied acetic acid for control of invasive *Spartina alterniflora*. *J. Aquat. Plant Manage.* 45: 100-105.
- Blok, W. J., J. G. Lamers, A. J. Termorshuizen, and G. J. Bollen. 2000. Control of soil borne plant pathogens by incorporating fresh organic amendments followed by tarping. *Phytopathology* 90: 253-259.
- Bonomoni, G., V. Antignani, C. Pane, and F. Scala. 2007. Suppression of soilborne fungal diseases with organic amendments. *J. Plant Pathol.* 89: 311-340.
- Chapman, B. and T. Ross. 2009. *Escherichia coli* and *Salmonella enterica* are protected against acetic acid, but not hydrochloric acid, by hypertonicity. *Appl. Environ. Microbiol.* 75: 3605-3610.
- Collings, L. K. M., K. L. Proudfoot, and D. M. Veira. 2011. The effects of feeding untreated and formic acid-treated colostrum ad libitum on intake and immunoglobulin levels in dairy calves. *Can. J. Anim. Sci.* 91: 55-59.
- Conn, K. L., M. Tenuta, and G. Lazarovits. 2005. Liquid swine manure can kill *Verticillium dahliae* microsclerotia in soil by volatile fatty acid, nitrous acid, and ammonia toxicity. *Phytopathology* 95: 28-35.
- Díaz, J. M., E. Ruiz, I. Romero, C. Cara, M. Moya, and E. Castro. 2009. Inhibition of *Pichia stipitis* fermentation of hydrolysates from olive tree cuttings. *World J. Microbiol. Biotechnol.* 25: 891-899.
- Escabeche. Etimología de escabeche. <http://etimologias.dechile.net/?escabeche> (Consulta: mayo 16, 20013).
- Fujii, K., C. Hayakawa, P. A. W. van Hees, S. Funakawa, and T. Kosaki. 2010. Biodegradation of low molecular weight organic compounds and their contribution to heterotrophic soil respiration in three Japanese forest soils. *Plant Soil* 334: 475-489.
- Gehan, Z. M. 2009. A new approach to evaluate the hygienic condition of commercial hatcheries. *Int. J. Poultry Sci.* 8: 1047-1051.
- Gehr, R., D. Chen, and M. Moreau, 2009. Performic acid (PFA): Tests on an advanced primary effluent show promising disinfection performance. *Water Sci. Technol.* 59: 89-96.
- George, S. M., A. Metris, and S. C. Stringer. 2008. Physiological state of single cells of *Listeria innocua* in organic acids. *Int. J. Food Microbiol.* 124: 204-210.
- Giannattasio, S., N. Guaragnella, and E. Marra. 2012. Molecular mechanisms of programmed cell death induced by acetic acid in *Saccharomyces cerevisiae*. *Microbiol. Monographs* 22: 57-75.
- Hassenberg, K., M. Geyer, and W. B. Herppich. 2010. Effect of acetic acid vapour on the natural microflora and *Botrytis cinerea* of strawberries. *Eur. J. Hortic. Sci.* 75: 141-146.

- Hu, S., T. S. Dong, S. R. Dalal, F. Wu, M. Bissonnette, J. H. Kwon, and E. B. Chang. 2011. The microbe-derived short chain fatty acid butyrate targets miRNA-dependent p21 gene expression in human colon cancer. *PLoS One* Jan 20;6(1): e16221. doi:10.1371/journal.pone.0016221.
- Jin, F. and E. Hejji. 2009. Hydrothermal conversion of biomass into value-added products: Technology that mimics nature. *BioResources* 4: 704-713.
- Kai, P., Ma. Fengming, and Wu Fengzhi. 2011. Composition of root exudates from cucumber cultivars differing in resistance to *Fusarium* wilt. *Allelopathy J.* 27: 175-184.
- Katase, M., C. Kubo, S. Ushio, E. Ootsuka, T. Takeuchi, and T. Mizukubo. 2009. Nematicidal activity of volatile fatty acids generated from wheat bran in reductive soil disinfection. *J. Nematol. Res.* 39: 53-62.
- Kim, H. L., B. N. Jung, and B. K. Sohn. 2007. Production of weak acid by anaerobic fermentation of soil and antifungal effect. *J. Microbiol. Biotechnol.* 17: 691-694.
- Lee, S. Y., M. S. Rhee, R. H. Dougherty, and D. H. Kang. 2010. Antagonistic effect of acetic acid and salt for inactivating *Escherichia coli* O157:H7 in cucumber puree. *J. Appl. Microbiol.* 108: 1361-1368.
- Lee, V. C., S. S. Yung, R. H. Li, B. Watzer, H. Schweer, E. H. Ng, and P. C. Ho. 2011. A randomized comparison of pharmacokinetics of a single vaginal dose of dry misoprostol or misoprostol moistened with normal saline or with acetic acid. *Hum. Reprod.* 26: 2981-2987.
- Li, W. C., Z. H. Ye, and M. H. Wong. 2010. Metal mobilization and production of short-chain organic acids by rhizosphere bacteria associated with a Cd/Zn hyperaccumulating plant, *Sedum alfredii*. *Plant Soil* 326: 453-467.
- Loretz, M., R. Stephan, and C. Zweifel. 2011. Antibacterial activity of decontamination treatments for cattle hides and beef carcasses. *Food Control* 22: 347-359.
- Mahran, A., M. Tenuta, M. L. Hanson, and F. Daayf. 2008a. Mortality of *Pratylenchus penetrans* by volatile fatty acids from liquid hog manure. *J. Nematol.* 40:119-126.
- Mahran, A., K. L. Conn, M. Tenuta, G. Lazarovits, and F. Daayf. 2008b. Effectiveness of liquid hog manure and acidification to kill *Pratylenchus* spp. in soil. *J. Nematol.* 40: 266-275.
- Marini-Kopp, M., J. L. Meirelles-Coimbra, V. Kopp da Luz, D. da Rosa-Farias, F. I. Felix de Carvalho, and A. Costa de Oliveira. 2007. Butyric acid tolerance of rice mutant M_4 families. *Crop Breed. Appl. Biotechnol.* 7: 373-380.
- Mazzola, M. 2010. Management of resident soil microbial community structure and function to suppress soilborne disease development. pp. 200-218. *In: M. Reynolds (ed.). Climate change and crop production.* CABI, Wallingford, UK.
- Medina, V. G., M. J. Almering, A. J. van Maris, and J. T. Pronk. 2010. Elimination of glycerol production in anaerobic cultures of a *Saccharomyces cerevisiae* strain engineered to use acetic acid as an electron acceptor. *Appl. Environ. Microbiol.* 76: 190-195.
- Méndez-Acosta, H. O., R. Snell-Castro, V. Alcaraz-González, V. González-Álvarez, and C. Pelayo-Ortiz. 2010. Anaerobic treatment of Tequila vinasses in a CSTR-type digester. *Biodegradation* 21: 357-363.
- Messiha, N. A. S., A. D. van Diepeningen, M. Wenneker, A. R. van Beuningen, J. D. Janse, T. G. C. Coenen, A. J. Termorshuizen, A. H. C. van Bruggen, and W. J. Blok. 2007. Biological soil disinfection (BSD), a new control method for potato brown rot, caused by *Ralstonia solanacearum* race 3 biovar 2. *Eur. J. Plant Pathol.* 117: 403-415.
- Mills, T. Y., N. R. Sandoval, and R. T. Gill. 2009. Cellulosic hydrolysate toxicity and tolerance mechanisms in *Escherichia coli*. *Biotechnol. Biofuels* 2: 26.
- Mitchell, A. M., G. A. Strobel, E. Moore, R. Robison, and J. Sears. 2010. Volatile antimicrobials from *Muscodyor crispans*, a novel endophytic fungus. *Microbiology* 156: 270-277.
- Mollapour, M. and P. W. Piper. 2007. Hog1 Mitogen-activated protein kinase phosphorylation targets the yeast fps1 aquaglyceroporin for endocytosis, thereby rendering cells resistant to acetic acid. *Mol. Cell. Biol.* 27: 6446-6456.
- Momma, N. 2008. Biological soil disinfection (BSD) of soilborne pathogens and its possible mechanisms. *Jpn. Agric. Res. Quart.* 42: 7-12.
- Momma, N., K. Yamamoto, P. Simandi, and M. Shishido. 2006. Role of organic acids in the mechanisms of biological soil disinfection (BSD). *J. Gen. Plant Pathol.* 72: 247-252.
- Momma, N., M. Momma, and Y. Kobara. 2010. Biological soil disinfection using ethanol: Effect on *Fusarium oxysporum* f. sp. *lycopersici* and soil microorganisms. *J. Gen. Plant Pathol.* 76: 336-344.
- Momma, N., Y. Kobara, and M. Momma. 2011. Fe²⁺ and Mn²⁺, potential agents to induce suppression of *Fusarium oxysporum* for biological soil disinfection. *J. Gen. Plant Pathol.* 77: 331-335.
- Muramoto, J., C. Shennan, A. Fitzgerald, S. Koike, M. Bolda, O. Dugovich, E. Roskopf, N. Kokalis-Burelle, and D. Butler. 2008. Effect of anaerobic soil disinfection on weed seed germination. *Proceedings of the Annual International Research Conference on Methyl Bromide Alternatives and Emissions Reductions: 109.1-109.3.* Orlando, FL, USA.
- Nawar, L. S. 2008. Prevention and control of fungi contaminated stored pistachio nuts imported to Saudi Arabia. *Saudi J. Biol. Sci.* 15: 105-112.
- Nkosi, B. D., R. Meeske, T. Langa, and R. S. Thomas. 2011. Effects of bacterial silage inoculants on whole-crop maize silage fermentation and silage digestibility in rams. *South African J. Anim. Sci.* 41: 350-359.
- Oh, D. H., Y. Pan, E. Berry, M. Cooley, R. Mandrell, and F. Breidt. 2009. *Escherichia coli* O157:H7 strains isolated from environmental sources differ significantly in acetic acid resistance compared with human outbreak strains. *J. Food Prot.* 72: 503-509.
- Okazaki, H. and K. Nose. 1986. Acetic acid and n-butyric acid as causal agents of fungicidal activity of glucose-amended flooded soil. *Ann. Phytopathol. Soc. Jpn.* 52: 384-393.
- Pang, J., T. Cuin, L. Shabala, M. Zhou, N. Mendham, and S. Shabala. 2007. Effect of secondary metabolites associated with anaerobic soil conditions on ion fluxes and electrophysiology in barley roots. *Plant Physiol.* 145: 266-276.
- Peñalva, M. A., J. Tilburn, E. Bignell, and H. N. Arst. 2008. Ambient pH gene regulation in fungi: Making connections. *Trends Microbiol.* 16: 291-300.

- Quiminet. [http://www.quiminet.com/pr3/Acido % 2 Bacetico.htm# t_prov](http://www.quiminet.com/pr3/Acido%20Bacetic.htm#t_prov). (Consulta: febrero 3, 2013).
- Ramsdale, M., L. Selway, D. Stead, J. Walker, Z. Yin, S. M. Nicholls, J. Crowe, E. M. Sheils, and A. J. P. Brown. 2008. MNL1 regulates weak acid-induced stress responses of the fungal pathogen *Candida albicans*. *Mol. Biol. Cell* 19: 4393-4403.
- Randall, P., P. Sholberg, G. Judd, and J. Cossentine. 2011. Acetic acid fumigation of fruit storage bins to control diapausing codling moth larvae. *HortScience* 46: 1634-1639.
- Reddy, M. R., N. R. Dhanutha, T. R. Kannaki, and R. P. Sharma. 2010. Evaluation of disinfectants against Newcastle disease virus in the presence of organic matter and water hardness. *Indian J. Poultry Sci.* 45: 81-83.
- Rousk, J., P. C. Brookes, and E. Bååth. 2010a. Investigating the mechanisms for the opposing pH relationships of fungal and bacterial growth in soil. *Soil Biol. Biochem.* 42: 926-934.
- Rousk, J., E. Bååth, P. C. Brookes, C. L. Lauber, C. Lozupone, J. G. Caporaso, R. Knight, and N. Fierer. 2010b. Soil bacterial and fungal communities across a pH gradient in an arable soil. *Int. Soc. Microbiol. Ecol. J.* 4: 1340-1351.
- Ryssel, H., O. Kloeters, G. Germann, T. Schäfer, G. Wiedemann, and M. Oehlbauer. 2009. The antimicrobial effect of acetic acid-an alternative to common local antiseptics *Burns* 35: 695-700.
- Ryssel, H., A. C. Radu, G. Germann, O. Kloeters, K. Riedel, M. Otte, and T. Kremer. 2011. Suprathel-antiseptic matrix: In vitro model for local antiseptic treatment? *Adv. Skin Wound Care* 24: 64-67.
- Sahrawat, L. K. 2008. Soil fertility advantages of submerged rice cropping systems: A review. *J. Sust. Agric.* 31: 5-23
- Samaniego-Gaxiola, J. A. 2008. Efecto del pH en la sobrevivencia de esclerocios de *Phymatotrichopsis omnivora* (Dugg.) Hennebert expuestos a Tilt y *Trichoderma* sp. *Rev. Mex. Fitopatol.* 26: 32-39.
- Samaniego-Gaxiola, J. A., F. J. Pastor-López, N. K. Cobos-Jara y B. M. Sánchez-García. 2011. Disminución de bacterias coliformes de la leche de cabra al acidificarla. pp. 106-108. En: V. M. González-Vázquez. (ed). *Memorias del Congreso Internacional de Inocuidad Alimentaria*. Universidad Autónoma de Coahuila, 5-7 de octubre. Saltillo, Coahuila, México.
- Samaniego-Gaxiola, J. A., J. E. Amaya-Carrillo y J. L. Puente-Manríquez. 2012. Evaluación de ácido acético como fumigante de mosquita blanca *Bemisia tabaci* (Gennadius) en laboratorio y campo. *Rev. Mex. Cienc. Agríc.* 3: 233-239.
- Samaniego-Gaxiola, J. A. and N. Balagurusamy. 2013. Survival of soil-borne fungus *Phymatotrichopsis omnivora* after exposure to volatile fatty acids. *J. Gen. Plant Pathol.* 79: 105-109.
- Senses-Ergul, S., S. Karasu-Yalcin, and Z. Y. Ozbas. 2007. The effect of some environmental parameters on the growth of yeasts originating from sugar containing foods. *Ann. Microbiol.* 57: 191-196.
- Shafiur, R. M. 2007. *Handbook of food preservation*. CRC Press. Boca Raton, FL, USA.
- Shan, Y., Z. Cai, Y. Han, S. E. Johnson, and R. J. Buresh. 2008. Organic acid accumulation under flooded soil conditions in relation to the incorporation of wheat and rice straws with different C:N ratios. *Soil Sci. Plant Nutr.* 54: 46-56.
- Shennan, C., J. Muramoto, S. Koike, M. Bolda, O. Daugovish, M. Mochizuk, E. Roskopf, N. Kokalis-Burelle, and D. Butler. 2010. Optimizing anaerobic soil disinfestation for strawberry production in California. *Proceedings of the Annual International Conference on Methyl Bromide Alternatives and Emissions Reductions*. Orlando, FL, USA.
- Sholberg, P. L. 2009. Control of postharvest decay by fumigation with acetic acid or plant volatile compounds. pp. 80-86. *In: Sivakumar D. (ed). New Trends in Postharvest Management of Fresh Produce I*. London, UK.
- Sholberg, P. L. and P. Randall. 2007. Fumigation of stored pome fruit with hexanal reduces blue and gray mold decay. *HortScience* 42: 611-616.
- Singh, R., P. Soni, P. Kumar, S. Purohit, and A. Singh. 2009. Biodegradation of high explosive production effluent containing RDX and HMX by denitrifying bacteria. *World J. Microbiol. Biotechnol.* 25: 269-275.
- Soylu, S., H. Yigitbas, E. M. Soyulu, and S. Kurts. 2007. Antifungal effects of essential oils from oregano and fennel on *Sclerotinia sclerotiorum*. *J. Appl. Microbiol.* 103: 1021-1030.
- Stavrou, T., J.-F. Müller, J. Peeters, A. Razavi, L. Clarisse, C. Clerbaux, P.-F. Coheur, D. Hurtmans, M. De Mazière, C. Vigouroux, N. M. Deutscher, D. W. T. Griffith, N. Jones, and C. Paton-Walsh. 2012. Satellite evidence for a large source of formic acid from boreal and tropical forests. *Nat. Geosci.* 5: 26-30.
- Sun, R., Q. Zhou, and S. Wei. 2011. Cadmium accumulation in relation to organic acids and nonprotein thiols in leaves of the recently found Cd hyperaccumulator *Rorippa globosa* and the Cd-accumulating plant *Rorippa islandica*. *J. Plant Growth Regul.* 30: 83-91.
- Tenuta, M., K. L. Conn, and G. Lazarovits. 2002. Volatile fatty acids in liquid swine manure can kill microsclerotia of *Verticillium dahlia*. *Phytopathology* 92: 548-552.
- Ushiwata, S. Y., Y. Amemiya, and K. Inubushi. 2009. Inhibition of in vitro growth of *Rhizoctonia solani* by liquid residue derived from steam-treated grass clippings. *J. Gen. Plant Pathol.* 75: 312-315.
- Wang, Y., Y. Zhang, J. Wang, and L. Meng. 2009. Effects of volatile fatty acid concentrations on methane yield and methanogenic bacteria. *Biom. Bioener.* 33: 848-853.
- WIPO (World Intellectual Property Organization). 2009. WIPO Publication No. 941(E). *World Intellectual Property Indicators*. Switzerland.
- Ye, Z.-L., Y. Zheng, Y.-H. Li, and W.-M. Cai. 2008. Use of starter culture of *Lactobacillus plantarum* BP04 in the preservation of dining-hall food waste. *World J. Microbiol. Biotechnol.* 24: 2249-2256.
- Yossa, N., J. Patel, P. Millner, and M. Lo. 2011. Inactivation of *Salmonella* in organic soil by cinnamaldehyde, eugenol, ecotrol, and sporan. *Foodborne Pathog. Dis.* 8: 311-317.
- Zhou, Z., Q. Meng, and Z. Yu. 2011. Effects of methanogenic inhibitors on methane production and abundances of methanogens and cellulolytic bacteria in in vitro ruminal cultures. *Appl. Environ. Microbiol.* 77: 2634-2639.
- Zoltán, S. 2008. Spatial and temporal pattern of soil pH and Eh and their impact on solute iron content in a wetland (Transdanubia, Hungary). *AGD Landscape Environ.* 2: 34-45.