

Revista Electrónica Nova Scientia

**Efecto de los surfactantes sobre la absorción de
agroquímicos en plantas**

**Effect of surfactants on the agrochemicals uptake by
plants**

**José Antonio Vera-Núñez¹, Oscar Arath Grageda-Cabrera²,
Josué Altamirano Hernández³ y Juan José Peña-Cabriales¹.**

¹Laboratorio de Microbiología Ambiental, Depto. Biotecnología y Bioquímica,
CINVESTAV-IPN, Unidad Irapuato, Irapuato, Guanajuato.

²Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, INIFAP-
CEBAJ, Celaya, Guanajuato.

³Facultad de Biología, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo,
Morelia, Michoacán.

Artículo por Invitación

México

Nombre de autor para correspondencia. Juan José Peña Cabriales, km 9.6 Lib. Nte., Carr. Irapuato-León, Apdo. Postal 629, CP. 36500. e-mail: jpena@ira.cinvestav.mx

© Universidad De La Salle Bajío (México)

Resumen

Introducción. La eficiencia de absorción y removilización de una molécula o compuesto químico aplicado a un sistema biológico depende de interacciones entre factores bióticos y abióticos. Para el caso de vegetales, destaca la composición físico-química y concentración de la molécula, el estado fisiológico del órgano donde se aplica y el manejo del producto (dosis y forma de aplicación). Existen diferentes tecnologías a base de compuestos químicos tensoactivos que permiten aumentar la absorción del compuesto aplicado en plantas de interés agrícola. El objetivo de este trabajo fue evaluar el efecto del surfactante INEX-A (COSMOCEL^{MR}) sobre la absorción de compuestos con actividad sistémica comúnmente aplicados en la agricultura a través del marcaje isotópico bajo condiciones de invernadero.

Métodos. Se desarrollaron los ensayos siguientes: 1) herbicida (¹⁴C-Glifosato) aplicado vía foliar en zacate Johnson (*Sorghum halepense*), 2) insecticida (¹⁴C-Imidacloprid) aplicado vía foliar, 3) insecticida (¹⁴C-Imidacloprid) aplicado vía suelo y 4) nutriente (³²P-Fosfato de amonio monobásico) aplicado vía foliar en tomate (*Lycopersicum esculentum*).

Resultados. El efecto del surfactante INEX-A aumentó la absorción de las moléculas en estudio en comparación con los tratamientos donde no se aplicó éste surfactante, esto generó una mayor removilización de las moléculas y probablemente una mayor producción de metabolitos secundarios que tienen como origen o intermediario a dichas moléculas. El efecto del surfactante INEX-A osciló en el rango 22-100 % en relación al incremento de la absorción de las moléculas en estudio. Cuando se aplicó el surfactante INEX-A se incrementó 12 veces la absorción del insecticida ¹⁴C-Imidacloprid aplicado vía foliar. Asimismo, la removilización hacia el grupo de hojas superiores vs. hojas inferiores fue mayor. Además, el efecto del INEX-A presentó una relación directa en función al tipo de molécula y la forma de aplicación, disminuyendo en el orden siguiente: ¹⁴C-Imidacloprid (foliar)>¹⁴C-Glifosato (foliar)>¹⁴C-Imidacloprid (suelo)>³²P-Fosfato de amonio monobásico (foliar).

Conclusiones. El surfactante INEX-A (COSMOCEL^{MR}) incrementa significativamente la absorción de diferentes compuestos en plantas de importancia económica.

Palabras clave: Tensoactivo, Isótopos, Actividad sistémica.

Recepción: 29-08-09

Aceptación: 25-09-09

Abstract

Introduction. The uptake and translocation of molecules and chemicals compounds applied to biological systems is a function of several interactions between biological and abiotics factors. In plant systems, these factors include physical-chemical composition and concentration of molecule, physiological stage of the target plant organ and management of chemical compound (doses and form of application). Technologies dealing with tensoactives or surfactants enhance the uptake of chemical compounds applied to crops. The objective of this study was to evaluate the effect of surfactant INEX-A (COSMOCELTM) on the uptake of agrochemical compounds using isotopic techniques under greenhouse conditions.

Methods. Several assays using agrochemical compounds isotopic labeled were conducted: 1) herbicide ¹⁴C-Glyphosate applied to foliage of Johnson grass (*Sorghum halepense*), 2) insecticide ¹⁴C-Imidacloprid applied to aerial part, 3) insecticide ¹⁴C-Imidacloprid applied to soil, and 4) fertilizer ³²P-Phosphate of ammonium monobasic applied to aerial part of tomato plant (*Lycopersicum esculentum*).

Results. The use of INEX-A increased the absorption of the molecules under study (herbicide ¹⁴C-Glyphosate, insecticide ¹⁴C-Imidacloprid applied to foliage and soil, and fertilizer ³²P-Phosphate of ammonium monobasic). The uptake of the molecules increased in a range from 22 to 100 % when compared to the control treatments (without INEX-A). The effect of the INEX-A showed a direct relation with the types of compounds tested and the effect decreased in the following order: ¹⁴C-Imidacloprid (aerial part)>¹⁴C-Glyphosate (aerial part)>¹⁴C-Imidacloprid (soil)>³²P-Phosphate of ammonium monobasic (aerial part).

Conclusions. The results showed a high tensoactive capability of INEX-A (COSMOCEL^{MR}) increasing the uptake of molecules with systemic activity by the crops.

Keywords. Tensoactive, Isotopes, Systemic activity.

Introducción

La eficiencia de absorción y removilización de agroquímicos depende de: 1) la composición físico-química y concentración del producto, 2) el estado fisiológico del órgano vegetal de aplicación, y 3) el manejo del compuesto -dosis y forma de aplicación- (FAO/IAEA, 1988; Marschner, 1985). La eficiencia de absorción de las moléculas o compuestos químicos en plantas puede ser optimizada a través del manejo de los factores mencionados.

Para la agricultura existen un gran número de formulaciones químicas enfocadas a incrementar la absorción (Werkheisser y Anderson, 1996) y por lo tanto, potenciar la actividad de compuestos nutrimentales, insecticidas y herbicidas. Un grupo de estos compuestos son los surfactantes, los cuales son moléculas anfipáticas constituidas por un componente hidrofóbico y otro hidrofílico que permiten aumentar, bajo ciertas condiciones, la penetración y disminuir las pérdidas de las moléculas en sistemas de interés por ejemplo herbicidas (Sprankle *et al.*, 1975). Este efecto es derivado de la disminución de la tensión interfases y superficial donde se aplican los surfactantes (Nitschke y Pastore, 2002). El uso de surfactantes enfocado a incrementar la eficiencia de los micronutrientos Zn y Mn ha demostrado que puede aumentar en hojas de naranjo hasta un 90 % cuando es aplicado el tensoactivo INEX-A *vs.* testigo (SARH-INIFAP-CECH, 1994 citado por COSMOCEL^{MR}, 2008).

La eficiencia de absorción de un gran número de moléculas aplicadas bajo condiciones de campo es baja. Así se han reportado valores en el rango 1-10 % para fertilizantes fosfóricos (Zapata y Axmann, 1991). En relación a compuestos herbicidas e insecticidas existen pocos estudios. Investigaciones con el insecticida imidacloprid reportan valores de absorción y removilización en el rango de 4.5-44.5 % empleando como trazador isotópico el ¹⁴C en plantas de algodón y trigo (Donecke *et al.*, 1993 citado Westwood *et al.*, 1998).

Así el uso de técnicas isotópicas ha demostrado ser una herramienta única, precisa y directa del aporte real de elementos o compuestos de interés en cultivos agrícolas. Por lo anteriormente descrito, el objetivo de este trabajo fue evaluar el efecto del surfactante INEX-A (COSMOCEL^{MR}) sobre la absorción de agroquímicos con actividad sistémica a través del marcaje isotópico bajo condiciones de invernadero: 1) herbicida (¹⁴C-Glifosato) aplicado vía foliar en zacate Johnson (*Sorghum halepense*), 2) insecticida (¹⁴C-Imidacloprid) aplicado vía

foliar, 3) insecticida (¹⁴C-Imidacloprid) aplicado al suelo y 4) nutriente (³²P-Fosfato de amonio monobásico) aplicado vía foliar en la planta de tomate (*Lycopersicum esculentum*).

Métodos

Material biológico y transplante

Zacate Johnson (*Sorghum halepense* L.): Se utilizó como planta indicadora el zacate Johnson. Las muestras se obtuvieron del estrato de suelo 0-30 cm de profundidad. A las muestras (aproximadamente 100 guías de 30 cm de longitud) del zacate, se les realizaron tres lavados con 2 L de agua desionizada durante 6 h por lavado para eliminar el suelo adherido al rizoma. Enseguida, las hojas y raíces del zacate fueron eliminadas. Posteriormente, se cortaron rizomas de 12 cm de longitud de la parte central de la muestra del zacate, cada rizoma contenía al menos 2 yemas vegetativas y 4 entrenudos visualmente sanos. A 70 rizomas se les aplicó un tratamiento fungicida a base de 1 g Ridomil L⁻¹ agua desionizada durante 30 min. Este material fue trasplantado en macetas de plástico (1.35 L de capacidad) -diseñadas para la recuperación de drenaje radiactivo- con 250 g sustrato por maceta, previamente irrigadas con 200 mL de agua desionizada y drenadas durante 4 h.

Para asegurar la emergencia de las hojas y enraizamiento del zacate, las macetas fueron expuestas durante la noche a 28 °C y durante el día (10:00 am a 15:00 pm) a temperatura ambiente. Durante el período experimental, las plantas fueron irrigadas cada 3 días con 60 mL agua destilada por riego. A las plantas brotadas, se les eliminó la hoja primaria y así permanecieron hasta alcanzar la formación de 3 hojas verdaderas y aproximadamente 20 cm de longitud, estas fueron seleccionadas como unidades experimentales y transferidas a la cámara blindada en el invernadero para la aplicación del herbicida ¹⁴C-Glifosato.

Para la obtención de raíces con el mínimo de destrucción, se utilizó una mezcla de tierra de hoja + vermiculita (STRONG-LITE^{MR}, SUNSHINE) + perlita (HORTIPEARL^{MR}) + suelo lama + SUNSHINE^{MR} (Mezcla 3) en relación 2:1:1:3:1 p/p, dicho sustrato fue fumigado con bromuro de metilo (Amebibron^{MR} 98/2) a una dosis de 1 lb Mg⁻¹ sustrato durante 24 h y 1 día de aireación.

Tomate (Lycopersicum esculentum L.): Se utilizaron plantas de tomate variedad “Super Río Grande” donadas por el Patronato de Desarrollo Agropecuario del Estado de Guanajuato. Las plantas provenían de almaciguera en invernadero de 30 días después de la emergencia (dde) con 15 cm de altura. Este material fue trasplantado en macetas de plástico (1.35 L de capacidad) - diseñadas para la recuperación de drenaje radiactivo- con 1.64 kg sustrato por maceta, previamente saturadas con 500 mL de agua desionizada y drenadas durante 4 h. Posteriormente, las unidades experimentales fueron transferidas a la cámara blindada en el invernadero para la aplicación del ¹⁴C-Imidacloprid y ³²P-Fosfato de amonio monobásico. Durante el período experimental, las macetas fueron irrigadas cada 3 días con 90 mL de agua destilada por riego.

En este experimento, se utilizó una mezcla de suelo lama + arena en relación 1:2 p/p. Las condiciones de fumigación y aireación del suelo lama fueron similares a las aplicadas en el sustrato para el zacate Johnson. Respecto a la arena, ésta fue lavada con agua corriente hasta la eliminación visible de materia orgánica (agua de lavado con color claro), posteriormente fue secada al aire bajo sombra y humedecida con 10 % p/v de agua desionizada estéril para la esterilización con calor seco a 120 °C durante 24 h con 1 día de enfriamiento y 3 días de esterilización (Bergeren *et al.*, 1988).

Factores experimentales

Derivado del análisis de productos surfactantes disponibles en el mercado, se seleccionó el surfactante INEX-A (COSMOCEL^{MR}) ya que en base al criterio de superficie de humectación en hojas de brócoli (cerosa) y de maíz (pilosa) presentó el valor mayor. Además de acuerdo a la ficha técnica del producto este contiene tensoactivos, emulsificantes y antiespumantes por lo que es considerado un producto integral. Se cuantificó el efecto del surfactante a una dosis recomendada (COSMOCEL^{MR}) de 2 mL INEX-A L⁻¹ agua y un testigo (control) sin aplicación del surfactante sobre la absorción de diferentes compuestos químicos con actividad sistémica (Cuadro 1).

Cuadro 1. Compuestos químicos y dosis en estudio.

Experimento	Planta	Compuesto	Función	Aplicación	Dosis (mL L ⁻¹ agua)
Exp. 1	Zacate Johnson	¹⁴ C-Glifosato	Herbicida	Foliar	12.5
Exp. 2	Tomate	¹⁴ C- Imidacloprid	Insecticida	Foliar	0.2
Exp. 3	Tomate	¹⁴ C- Imidacloprid	Insecticida	Suelo	0.8
Exp. 4	Tomate	³² P-MAP [€]	Nutritivo	Foliar	5.0 [¶]

*Fosfato de amonio monobásico; [¶]g L⁻¹ agua.

Diseño experimental

Todos los experimentos se instalaron en cámara blindada en invernadero bajo un diseño estadístico totalmente al azar con cuatro repeticiones, y cada experimento fue analizado independientemente.

Marcaje isotópico

Con la finalidad de cuantificar la absorción y/o penetración neta de las moléculas de interés por efecto del surfactante INEX-A (COSMOCEL^{MR}), se aplicaron los siguientes compuestos marcados isotópicamente: 1) herbicida ¹⁴C-Glifosato (ARC^{MR}) y 2) insecticida ¹⁴C-Imidacloprid (BAYER^{MR}) con una actividad de 100 y 50 µCi mL⁻¹ solución, respectivamente y 3) nutriente ³²P-MAP (AMERSHAM^{MR}) se aplicó una solución “carrier free” con una actividad de 10 mCi mL⁻¹. Dichos compuestos se aplicaron a la planta y/o suelo en dosis y actividad equivalentes a las planteadas experimentalmente (Cuadro 2). Asimismo, se consideraron las constantes de decaimiento de los isótopos ($T^{1/2}$ vida media) equivalentes a 5730 años y 14.28 días para el ¹⁴C y ³²P, respectivamente (Kessler, 1988; Vera-Núñez *et al.*, 2000).

Cuadro 2. Actividad isotópica y dosis equivalentes de los compuestos aplicados en el estudio.

Experimento	Actividad ^e ($\mu\text{Ci planta}^{-1}$)	Volumen ^f ($\mu\text{L planta}^{-1}$)	Gotas ^g (No. planta ⁻¹)
Exp. 1	1	124	248
Exp. 2	1	124	248
Exp. 3	1	144	288
Exp. 4	100	124	248

^e μCi (microcurie)=unidad de actividad equivalente a 2.22×10^6 dpm; ^fIncluye la cantidad de agua + volumen del INEX-A + el isótopo aplicados en la solución; ^g1 gota equivale $0.5 \mu\text{L}$.

Exp. 1: Zácate Johnson/INEX-A/¹⁴C-Glifosato (foliar): Se seleccionaron las plantas de zácate Johnson de altura uniforme (aproximadamente 20 cm) con 3 hojas desarrolladas, cuando fue necesario se eliminaron las hojas senescentes. Posteriormente, las macetas fueron irrigadas con 100 mL agua desionizada y cada hoja fue limpiada con un hisopo humedecido con agua desionizada-estéril, enseguida fue aplicado el ¹⁴C-Glifosato a una dosis de 41 gotas hoja⁻¹.

Exp. 2: Tomate/INEX-A/¹⁴C-Imidacloprid (foliar): Para los Exp. 2 y 3, las condiciones experimentales para la aplicación de ¹⁴C-Imidacloprid fueron estandarizadas con ¹⁴C-Nitroguanidina (ARC^{MR}), molécula genérica del insecticida. Cada planta de tomate tenía en promedio 7 grupos de hojas con un grupo apical en formación y un grupo basal senescente, los cuales fueron descartados para la aplicación del insecticida ¹⁴C-Imidacloprid, y cada grupo de hojas estaba conformado por 7 hojas (las hojas inferiores en desarrollo fueron descartadas para el marcaje isotópico). Enseguida, el sustrato fue “aflojado” aplicando presión a la maceta con ambas manos alrededor de las mismas. Posteriormente, las macetas fueron irrigadas con 120 mL agua desionizada. Para la aplicación del insecticida ¹⁴C-Imidacloprid, se seleccionó y marcó con corrector de agua color blanco el grupo de hojas central a las cuales se les aplicó el insecticida ¹⁴C-Imidacloprid a una dosis de 10 gotas por hoja. A las hojas restantes se les aplicó la misma dosis y número de gotas con Imidacloprid sin marcar con ¹⁴C.

Exp. 3: Tomate/INEX-A/¹⁴C-Imidacloprid (suelo): Las macetas fueron irrigadas con 25 mL agua desionizada y se hizo una cepa de aproximadamente 1 cm de profundidad a 2.5 cm de distancia alrededor de la base del tallo de la planta. Enseguida, se aplicó al suelo el insecticida ¹⁴C-

Imidacloprid a una dosis de 14.4 μL 10 aplicaciones⁻¹ e inmediatamente la cepa se tapó con la ayuda de un abatelenguas clínico, y se selló la misma con 95 mL de agua desionizada.

Exp. 4: Tomate/INEX-A/ ^{32}P -MAP (foliar): En este experimento, el procedimiento de aplicación del nutrimento ^{32}P -MAP, “aflojamiento” de sustrato, irrigación, selección de hojas y gotas de aplicación fue igual al implementado en el Exp. 2.

Muestreo y cuantificación de la actividad isotópica

Se muestrearon los órganos vegetales de interés en dos etapas: 5 y 10-15 días después de la aplicación (dda) de los isótopos.

Exp. 1: El sistema radical se extrajo 4 h después de la aplicación de un riego de 80 mL agua desionizada. Posteriormente, el sistema radical fue lavado 3 veces con 100 mL agua desionizada para eliminar al máximo posible el suelo adherido. Enseguida, las raíces fueron secadas con papel adsorbente para la determinación de la masa fresca.

Exp. 2-4: Procedimiento similar al Exp. 1. Se muestrearon los grupos de hojas ubicados superiores e inferiores, en relación al grupo donde se aplicó el insecticida ^{14}C -Imidacloprid (Exp. 2). Para el Exp. 3 se cortó la parte aérea (hoja + tallo) y en el Exp. 4 fueron muestreados los órganos hoja y tallo por separado cortándose a nivel de la base de la planta de tomate. Se cuantificó la masa fresca de cada órgano de interés e inmediatamente se transfirieron a un horno de convección (UT 6200, Heraus) a 70 °C hasta masa constante durante aproximadamente 3 días y cuantificar la masa seca empleando una balanza analítica (Explorer, OHAUS). En los Exp. 1-3, una vez tomada la muestra para la cuantificación de la actividad isotópica se procedió al tratamiento térmico descrito para la determinación de la masa seca.

Autoradiografía

De las raíces extraídas lavadas y eliminando el exceso de humedad del Exp. 1 se tomaron aproximadamente 4 raíces por maceta (repeticIÓN I de la etapa 5 dda) de aproximadamente 8 cm de longitud, las cuales fueron sonicadas (BRANSON 1200, LAB-LINE) durante 5 min. Para la obtención de la autorradiografía (Sebastianelli, 1990) se utilizó un “cassette” (Kodak Omatic 24x21 cm) con película radiográfica de alta resolución (BIOMAX^{MR}, Kodak 24x21 cm) expuesta

con las muestras marcadas isotópicamente durante 90 días a -20 °C. Para revelar las películas radiográficas (X-OMAT M-20^{MR} PROCESSOR, Kodak) se utilizó un procedimiento estándar. En los Exp. 2-4, las radiografías fueron obtenidas en condiciones similares a las implementadas en el Exp. 1, excepto que por tratarse de plantas completas y tamaño mayor se utilizó un “cassette” (SPECTROLINE^{MR}, SPECTRONIC) y película radiográfica (BIOMAX^{MR}, Kodak) de 36x43 cm. Asimismo, se utilizaron diferentes tiempos de exposición en función de la actividad y energía de los isótopos (¹⁴C 156.5 y ³²P 1710.4 keV), siendo 60 días, 8-15 días y 2 h para los Exp. 2, 3 y 4, respectivamente (Sebastianelli, 1990).

Actividad ¹⁴C

Para la cuantificación de la actividad isotópica de ¹⁴C y ³²P se utilizó un contador de centelleo (TRI-CARB^{MR} 2100, PACKARD). En el caso del ¹⁴C se tomó una muestra en fresco de aproximadamente 100-200 mg (posteriormente se corrigieron los valores en base seca, siendo equivalentes a 10-40 mg muestra⁻¹) en viales para centelleo de vidrio de 20 mL de capacidad (PACKARD), posteriormente se aplicó 1 mL de solubilizador de tejido (SOLVABLE^{MR}, DUPONT) durante 24 h, una vez obtenido el solubilizado se aplicaron 19 mL de “cocktel” centellador (INSTA-GEL^{MR} XF, PACKARD). Las muestras fueron leídas durante 1 minuto y corregidas en base a un estándar de ¹⁴C con una actividad de 2.22x10⁵ dpm y una eficiencia de conteo de 92 %, además, fueron corregidas con una curva de calibración de fotoluminiscencia a base de clorofila (Sebastianelli, 1990).

Actividad ³²P

La cuantificación de la actividad de ³²P se realizó por el método Cerenkov (Kessler, 1988), para lo cual se tomaron aproximadamente 10-50 mg muestra⁻¹ en tubos de digestión (TECATOR^{MR}) de 50 mL de capacidad con 10 mL de una solución de ácido nítrico: ácido perclórico 98 % en relación 5:1 v/v (Vera-Núñez *et al.*, 2000). La muestras fueron digeridas a una temperatura de 120 °C (1016 Digestor 40^{MR}, TECATOR) durante aproximadamente 2 h hasta evaporación (1 mL de digerido). La muestra digerida fue transferida a viales de plástico de 20 mL de capacidad (PACKARD), posteriormente se aplicaron 19 mL de agua desionizada como “centellador”. Las muestras fueron leídas durante 1 minuto y corregidas en base a un estándar de

^{32}P con una actividad de 2.22×10^6 dpm y una eficiencia de conteo de 54 %, además, fueron corregidas con una curva de calibración de “quenching” químico (Sebastianelli, 1990).

Análisis estadístico

Los valores obtenidos tanto de las variables fisiológicas (masa seca, mg órgano vegetal $^{-1}$) como de la actividad isotópica de ^{14}C y ^{32}P (actividad, dpm mg $^{-1}$ órgano vegetal) fueron analizados por procedimientos estándar de análisis de varianza. Asimismo, se aplicó la prueba de Tukey ($p \leq 0.05$) para la separación de medias utilizando el paquete estadístico STATNL (Olivares-Sáenz, 1993).

Resultados

Exp. 1: INEX-A/ ^{14}C -Glifosato (herbicida foliar) en zacate Johnson

El efecto del surfactante INEX-A sobre la producción de biomasa seca del zacate Johnson se muestra en el Cuadro 3. Los resultados indican un efecto herbicida mayor del ^{14}C -Glifosato cuando se aplicó el surfactante INEX-A, tanto en términos de disminución de la masa seca como el incremento de su actividad en la parte radical. Asimismo, se observó un mayor efecto herbicida por efecto del surfactante INEX-A a los 5 dda vs. 11 dda.

Comparativamente, en términos de biomasa cuando se aplicó el tratamiento INEX-A/ ^{14}C -Glifosato, la producción de biomasa del zacate Johnson disminuyó en aproximadamente 50 %, resultados similares fueron observados en la producción de raíz. Al respecto, se estimó que la actividad herbicida se incrementó -por tratarse de un desecante- con la aplicación del surfactante INEX-A/ ^{14}C -Glifosato, por lo cual la producción de biomasa tanto de hojas + tallo como de raíz disminuyó significativamente entre la etapas de evaluación 5 vs. 11 dda.

Cuadro 3. Efecto de la aplicación del surfactante INEX-A (COSMOCEL^{MR})/¹⁴C-Glifosato aplicado vía foliar sobre la producción de biomasa de zacate Johnson (*Sorghum halepense* L.).

Tratamiento	Etapa	Biomasa seca	
	(dda)	Hojas+Tallo ----- (mg planta ⁻¹) ^e	Raíz
Con INEX-A/ ¹⁴ C-Glifosato	5	400±40	25±6
	11	358±46	48±5
Sin INEX-A/ ¹⁴ C-Glifosato	5	830±72	60±8
	11	690±89	70±14
Coeficiente Variación (%):		16	17
Probabilidad P>F:		0.001	0.0001
Tukey ($p \leq 0.05$): INEX-A (I):		162	10
ETAPA (E):		NS	NS
Interacción I x E:		NS	NS

dda=días después de la aplicación; ^eValores promedio de cuatro repeticiones; ^fPrueba de Tukey ($p \leq 0.05$); NS=No significativo estadísticamente.

El efecto del surfactante INEX-A sobre la actividad del herbicida ¹⁴C-Glifosato se muestra en el Cuadro 4. Se obtuvieron datos similares a los obtenidos en la producción de biomasa seca. En términos generales, se detectó una mayor actividad herbicida del ¹⁴C-Glifosato en la raíz cuando se aplicó el tratamiento con el surfactante INEX-A vs. cuando no se aplicó el surfactante. Esto indica un efecto positivo en la penetración y removilización del herbicida de la parte aérea hacia la raíz. Cualitativamente, se observó un mayor revelado de la película radiográfica, lo cual indica una mayor actividad del ¹⁴C proveniente del ¹⁴C-Glifosato cuando se aplicó el surfactante INEX-A -a mayor revelado o mayor oscuridad de la radiografía indica una mayor actividad de ¹⁴C- y por lo tanto de la actividad herbicida del ¹⁴C-Glifosato (Fig. 1). Similar a lo estimado para la variable biomasa, se obtuvo una correlación inversa entre la actividad del ¹⁴C-Glifosato y la producción de raíz.

Cuadro 4. Efecto de la aplicación del surfactante INEX-A (COSMOCEL^{MR}) aplicado vía foliar sobre la actividad sistémica herbicida del ¹⁴C-Glifosato en zacate Johnson (*Sorghum halepense* L.).

Tratamiento	Actividad ¹⁴C-Glifosato (dpm mg ⁻¹ raíz) ^ε	
	5 Etapa	11 Etapa
Con INEX-A/ ¹⁴ C-Glifosato	834±78	799±21
Sin INEX-A/ ¹⁴ C-Glifosato	437±42	375±21
Coeficiente Variación (%):	7	
Probabilidad P>F:	0.0001	
Tukey ($p \leq 0.05$): INEX-A (I):	51	
ETAPA (E):	NS	
Interacción I x E:	NS	

dpm=desintegraciones por minuto; dda=días después de la aplicación; ^εValores promedio de dos muestras analíticas por repetición; [¶]Prueba de Tukey ($p \leq 0.05$); NS=No significativo estadísticamente.

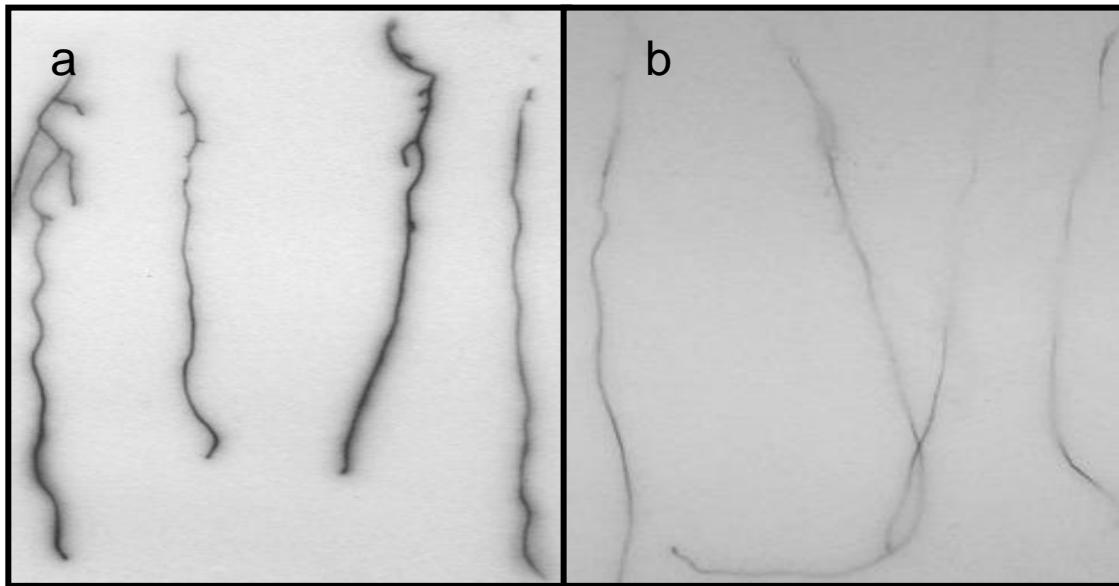


Fig. 1. Radiografía a los 5 después de la aplicación del ¹⁴C-Glifosato/INEX-A vía foliar en zacate Johnson (*Sorghum halepense* L.). a) Con INEX-A/¹⁴C-Glifosato; b) Sin INEX-A/¹⁴C-Glifosato.

Exp. 2: INEX-A/¹⁴C-Imidacloprid (insecticida foliar) en tomate

El efecto del surfactante INEX-A sobre la actividad del insecticida ¹⁴C-Imidacloprid aplicado vía foliar se muestra en el Cuadro 5. Los datos indican una mayor actividad del insecticida ¹⁴C-Imidacloprid cuando se aplicó el surfactante INEX-A vs. cuando no se aplicó el surfactante, siendo equivalente a 40 %. Asimismo, se cuantificó una mayor actividad isotópica del ¹⁴C-Imidacloprid, indicando que el surfactante INEX-A mostró un efecto positivo en la removilización del insecticida de la parte foliar de aplicación hacia las hojas inferiores.

Por el contrario, cuando no se aplicó el surfactante INEX-A, se determinó una relativa mayor actividad isotópica del insecticida ¹⁴C-Imidacloprid en las hojas superiores en aproximadamente 5 veces mayor en comparación con las hojas inferiores, aunque este valor fue 12 veces menor en comparación cuando se aplicó el surfactante INEX-A.

Cualitativamente, la radiografía muestra una mayor actividad del insecticida ¹⁴C-Imidacloprid cuando se aplicó el surfactante INEX-A -a mayor revelado o mayor oscuridad de la radiografía indica una mayor acumulación de ¹⁴C- y por lo tanto del insecticida ¹⁴C-Imidacloprid (Fig. 2). Asimismo, se detectó una proporción alta de la sal insecticida ¹⁴C-Imidacloprid sobre la superficie foliar después de la evaporación del agua de disolución del ¹⁴C-Imidacloprid (Fig. 2b). Esto indica que una parte considerable del insecticida no penetró la superficie foliar y por tratarse de un insecticida con actividad sistémica no manifiesta su funcionalidad. También se observó una considerable removilización del ¹⁴C-Imidacloprid hacia los ápices foliares cuando se aplicó el surfactante INEX-A (Fig. 2a).

Cuadro 5. Efecto de la aplicación del surfactante INEX-A (COSMOCEL^{MR}) sobre la actividad sistémica insecticida del ¹⁴C-Imidacloprid aplicado vía foliar en tomate (*Lycopersicum esculentum* L.).

Tratamiento	Órgano	Actividad ¹⁴ C-Imidacloprid (dpm mg ⁻¹ hoja) ^e	
		5	15
----- (dda) -----			
Con INEX-A/ ¹⁴ C-Imidacloprid	Hoja superior ^s	1554±199	159±35
	Hoja inferior ^{ss}	2594±318	1438±178
Sin INEX-A/ ¹⁴ C-Imidacloprid	Hoja superior	122±7	30±7
	Hoja inferior	26±7	61±8
Coeficiente Variación (%):	§22/§§18		
Probabilidad P>F:	§I=0.000	E=0.000	IxE=0.000
	§§I=0.000	E=0.000	IxE=0.000
Tukey ($p \leq 0.05$):			
INEX-A (I):	§110/§§198		
ETAPA (E):	§110/§§198		
Interacción I x E:	§155/§§280		

dpm=desintegraciones por minuto; dda=días después de la aplicación; §, §§=En relación a la hoja de aplicación del ¹⁴C-Imidacloprid; ^eValores promedio de dos muestras analíticas por repetición; ^fPrueba de Tukey ($p \leq 0.05$).

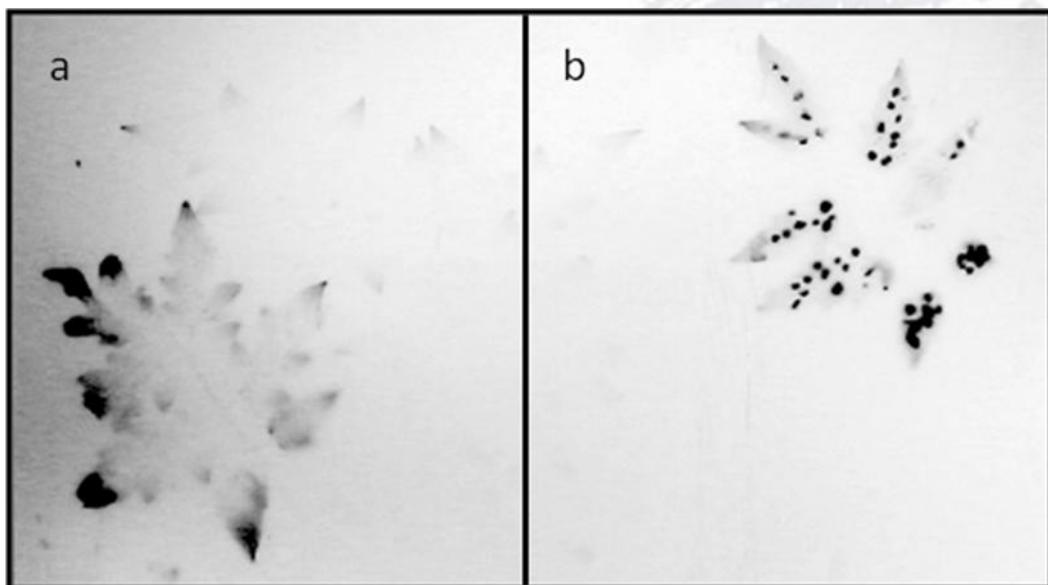


Fig. 2. Radiografía a los 6 después de la aplicación del ^{14}C -Imidacloprid/INEX-A vía foliar en tomate (*Lycopersicum esculentum* L.). a) Con INEX-A/ ^{14}C -Imidacloprid; b) Sin INEX-A/ ^{14}C -Imidacloprid.
Exp. 3: INEX-A/ ^{14}C -Imidacloprid (insecticida suelo) en tomate

El efecto del surfactante INEX-A sobre la actividad del insecticida ^{14}C -Imidacloprid aplicado vía suelo se muestra en el Cuadro 6. Similar a lo cuantificado cuando se aplicó el insecticida vía foliar, los datos indican una mayor actividad del ^{14}C -Imidacloprid cuando el surfactante INEX-A/ ^{14}C -Imidacloprid es aplicado vía suelo vs. cuando no se aplicó el surfactante, indicando que el surfactante tuvo un efecto positivo en la removilización del insecticida ^{14}C -Imidacloprid aplicado al suelo hacia la parte foliar. Asimismo, se estimaron diferencias en términos de actividad entre las etapas de evaluación del insecticida ^{14}C -Imidacloprid. Es importante remarcar que la magnitud del efecto fue 4.3 veces menor en comparación a la aplicación vía foliar.

Cualitativamente, se observó una mayor actividad de ^{14}C -Imidacloprid, cuando se aplicó el surfactante -a mayor revelado o mayor oscuridad de la radiografía indica una mayor acumulación de ^{14}C - y por lo tanto del insecticida imidacloprid (Fig. 3).

Cuadro 6. Efecto de la aplicación del surfactante INEX-A (COSMOCEL^{MR}) sobre la actividad sistémica insecticida del ^{14}C -Imidacloprid aplicado al suelo en tomate (*Lycopersicum esculentum* L.).

Tratamiento	Órganos	Actividad ^{14}C -Imidacloprid (dpm mg ⁻¹) [€]	
		5	15 (dda)
Con INEX-A/ ^{14}C -Imidacloprid	H + T	683±43	739±98
Sin INEX-A/ ^{14}C -Imidacloprid	H+ T	564±21	385±59
Coeficiente Variación (%):	10		
Probabilidad P>F:	I=0.007	E=0.000	IxE=0.003
Tukey ($p\leq 0.05$):			
INEX-A (I):	67		
ETAPA (E):	67		
Interacción I x E:	95		

dpm=desintegraciones por minuto; dda=días después de la aplicación; [€]Valores promedio de dos muestras analíticas por repetición; [¶]Prueba de Tukey ($p\leq 0.05$).

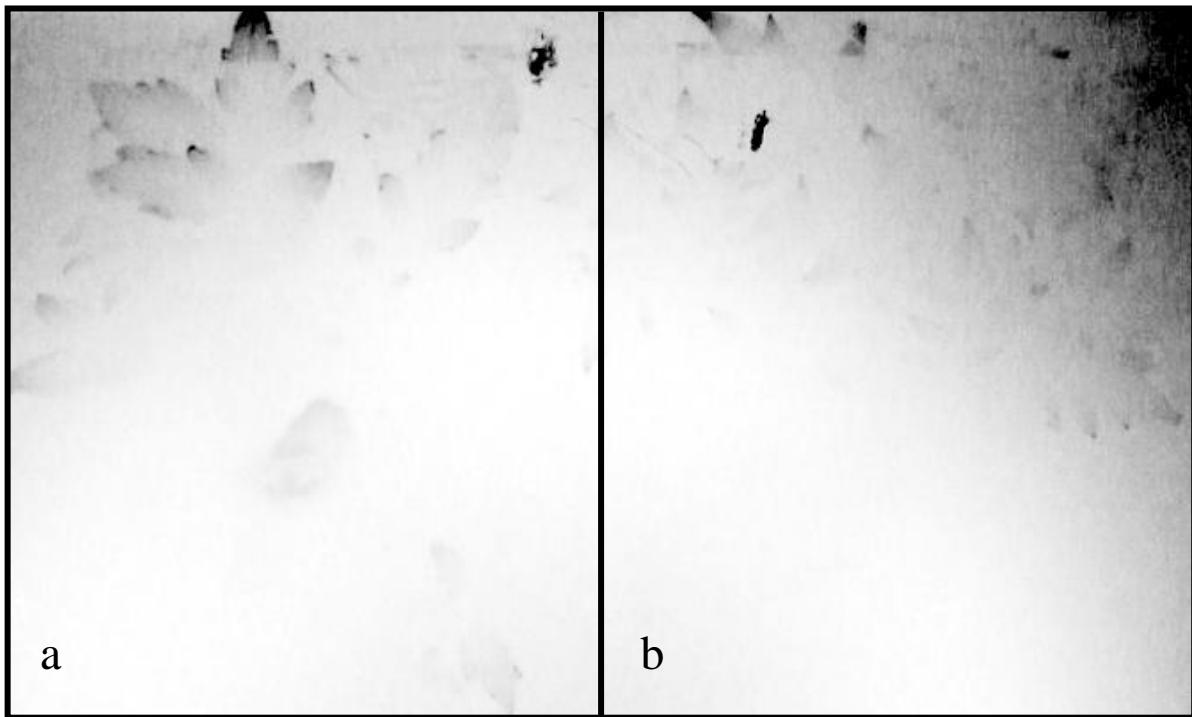


Fig. 3. Radiografía a los 5 después de la aplicación del ¹⁴C-Imidacloprid/INEX-A en suelo con tomate (*Lycopersicum esculentum* L.). a) Con INEX-A/¹⁴C-Imidacloprid; b) Sin INEX-A/¹⁴C-Imidacloprid.

Exp. 4: INEX-A/³²P-MAP (nutriamento foliar) en tomate

El efecto del surfactante INEX-A sobre la absorción del ³²P-Fosfato de amonio monobásico (MAP) aplicado vía foliar se muestra en el Cuadro 7. Los datos indican una mayor absorción del ³²P-MAP en toda la planta cuando se aplicó el surfactante INEX-A vs. cuando no se aplicó el surfactante, indicando que este tuvo un efecto positivo en la penetración, absorción y removilización del ³²P-MAP de la parte foliar de aplicación hacia el tallo y la raíz. El MAP dentro los fertilizantes compuestos posee el índice de disolución mayor, por lo anterior, probablemente las diferencias en magnitud del efecto del surfactante INEX-A sobre la absorción y removilización del nutriente fue menor en comparación con los otros compuestos evaluados.

Cualitativamente, se observó un efecto del surfactante INEX-A equivalente a una mayor actividad del ³²P proveniente del MAP vs. cuando no se aplicó el surfactante -a mayor revelado o mayor oscuridad de la radiografía indica una mayor acumulación de ³²P- y por lo tanto del nutriente P del MAP (Fig. 4).

Cuadro 7. Efecto de la aplicación del surfactante INEX-A (COSMOCEL^{MR}) sobre la absorción del ³²P-Fosfato de amonio monobásico (MAP) aplicado vía foliar en tomate (*Lycopersicum esculentum* L.).

Tratamiento	Órgano	Actividad ³² P-MAP	
		(dpm mg ⁻¹)*	Etapa
		5	15
Con INEX-A/ ³² P-MAP	Hoja	483±6	409±39
	Tallo	878±29	672±22
Sin INEX-A/ ³² P-MAP	Hoja	406±89	148±27
	Tallo	698±29	656±76
Coeficiente Variación (%):	§11/§§7		
Probabilidad P>F:	§I=0.000 §§I=0.002	E=0.000 E=0.000	IxE=0.001 IxE=0.006
Tukey ($p \leq 0.05$):**			
INEX-A (I):	§45/§§52		
ETAPA (E):	§45/§§52		
Interacción I x E:	§63/§§74		

dpm=desintegraciones por minuto; dda=días después de la aplicación; §, §§=Órgano de cuantificación del ³²P-MAP;

*Valores promedio de dos muestras analíticas por repetición; **Prueba de Tukey ($p \leq 0.05$).

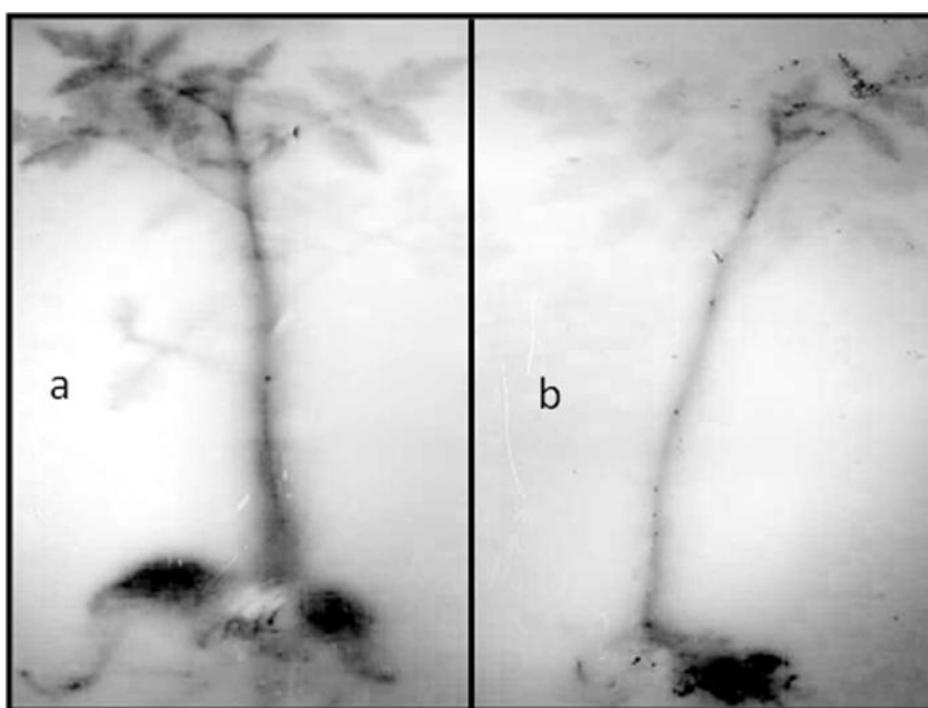


Fig. 4. Radiografía a los 6 después de la aplicación del ³²P-MAP/INEX-A en suelo con tomate (*Lycopersicum esculentum* L.). a) Con INEX-A/³²P-MAP; b) Sin INEX-A/³²P-MAP.

Discusión

El uso de surfactantes o tensoactivos ha ganado importancia derivado de sus propiedades coadyuvantes y su potencial de aplicación en una amplia gama de actividades como la agricultura, cosméticos, cerámicas, etc. para disminuir los fenómenos físico-químicos de interfasas sólido-líquido, su aplicación en la agricultura se enfoca a aumentar la absorción de moléculas con actividad herbicida, insecticida y nutrimental. No obstante que la mayoría de los agroquímicos, principalmente herbicidas e insecticidas, en su formulación contienen coadyuvantes con diferente función, su proporción es limitada por los materiales inertes del producto.

La actividad de los compuestos sistémicos evaluados en este trabajo se incrementó por efecto del surfactante INEX-A (Cuadro 4-7). Este incremento fue equivalente a 1-100 veces mayor cuando se aplicó el surfactante INEX-A *vs.* cuando no se aplicó en función del compuesto y la aplicación (foliar y suelo). En este sentido, se ha demostrado que complementar las aplicaciones de agroquímicos con surfactantes conlleva a incrementar la absorción de los mismos sobre todo en interacciones líquido-sólido.

Dependiendo de la formulación de agroquímicos, los cuadyuvantes de las moléculas de interés agrícola pueden incluir solventes, cosolventes, emulsificantes, agentes humectantes, antirefrigerantes y materiales inertes complementarios (Knowles, 1995), la proporcionalidad de estos aditivos en la formulación de tecnologías con fines de aplicación en la agricultura conlleva a incrementar la robustez y funcionalidad de los tensoactivos, lo cual genera una mayor eficiencia en la aplicación de agroquímicos. El ajuste de la composición y naturaleza de los componentes de los surfactantes conduce a la versatilidad del mismo cuando se aplican agroquímicos (Bolsman *et al.*, 1988).

Existen pocos estudios que han considerado el efecto de la formulación del producto agroquímico sobre la adsorción de herbicidas en suelo. Comparativamente, los resultados experimentales presentados aquí demostraron una eficiencia mayor de absorción del insecticida ¹⁴C-Imidacloprid por efecto del surfactante INEX-A aun en la aplicación al suelo, aunque el valor observado de actividad del ¹⁴C-Imidacloprid en suelo fue tres veces menor *vs.* la aplicación del insecticida vía foliar. Al respecto, se ha demostrado que la adsorción de la atrazina

complementada con surfactantes no iónicos en suelo saturado en los sitios de intercambio catiónico por Ca^{+2} y K^+ se incrementa sustancialmente (Chappell *et al.*, 2005). Actualmente, se han sintetizado químicamente o aislado y purificado un gran número de surfactantes no iónicos de uso en la formulación de agroquímicos o bien para su uso en la aplicación de estos (Chappell *et al.*, 2005). Así, se ha reorientado la formulación de tecnologías surfactantes a través de la complementación de tensoactivos catiónicos con polímeros, los cuales han mostrado un alto poder de disolución (Kwak 1998; Bakshi y Kaur, 2003).

Desde el punto de vista agronómico, la función principal de los surfactantes o tensoactivos es incrementar la superficie de contacto entre fases sólido (hoja vegetal o suelo)-líquido (agroquímico en solución) a través de la humectación, aunque este fenómeno depende de diferentes factores entre los cuales destaca la naturaleza de la cabeza del surfactante (hidrofílica) como el principal factor incidente en la adsorción y absorción -a nivel translaminar de la hoja-. Además de la carga (aniónica o catiónica) como el principal factor que incide en la eficiencia de la aplicación de agroquímicos complementados con surfactantes o tensoactivos (Bolsman *et al.*, 1988).

A nivel estructural se ha demostrado que dicho factor incide directamente sobre la eficiencia de disolución de las fases sobre todo en compuestos de alta viscosidad (Bolsman *et al.*, 1988). Desde el punto de vista ambiental, la temperatura y humedad relativa del medio influyen directamente sobre la funcionalidad de los surfactantes, ya que algunos solidifican a valores bajos de estas condiciones. Por otro lado, se ha demostrado que los surfactantes pueden influir la penetración cuticular de agroquímicos funcionando como cosolventes sobre la superficie o afectando las propiedades de transporte de la cutícula por penetración simultánea dentro de la misma. Después de la penetración cuticular, se activa el transporte pasivo por difusión (Schönherr y Baur, 1994).

Los resultados experimentales del presente trabajo demostraron un efecto positivo -en términos de incremento de penetración y absorción de los compuestos sistémicos evaluados- por la aplicación del surfactante INEX-A indicando una relación directa en función al tipo de molécula y la forma de aplicación, disminuyendo en el orden siguiente: ^{14}C -Imidacloprid (foliar) $>$ ^{14}C -Glifosato (foliar) $>$ ^{14}C -Imidacloprid (suelo) $>$ ^{32}P -Fosfato de amonio monobásico (foliar).

Conclusiones

Los resultados experimentales indicaron que la aplicación del INEX-A aumenta la penetración y absorción de las moléculas en estudio en comparación con los tratamientos donde no se aplicó el surfactante, esto condujo a una mayor removilización de las moléculas y algunos derivados de las mismas.

El efecto del surfactante INEX-A resultó en un incremento de la absorción de las moléculas en estudio que osciló en el rango 22-100 % en comparación a los tratamientos sin surfactante. En el caso específico del insecticida ^{14}C -Imidacloprid aplicado vía foliar, la absorción de la molécula fue 12 veces mayor en comparación al tratamiento sin aplicación del INEX-A. Asimismo, la removilización hacia el grupo de hojas inferiores *vs.* grupo de hojas superiores fue mayor.

El efecto del surfactante INEX-A presentó una relación directa en función del tipo de molécula y la forma de aplicación, siendo el efecto: ^{14}C -Imidacloprid (foliar) $>$ ^{14}C -Glifosato (foliar) $>$ ^{14}C -Imidacloprid (suelo) $>$ ^{32}P -Fosfato de amonio monobásico (foliar).

Estos resultados indican un alto potencial tensoactivo del surfactante INEX-A (**COSMOCEL^{MR}**) que incrementa significativamente la absorción de diferentes compuestos de interés agrícola en plantas de importancia económica.

Agradecimientos. A la empresa **COSMOCEL^{MR}** e Ing. Raúl Bribiesca Aguilar por facilitar los reactivos claves para el desarrollo de la investigación, así como sus comentarios para el fortalecimiento del proyecto.

Referencias

Bakshi, M. and I. Kaur. (2003). Surfactant–polymer aggregates of mixed cationic micelles and anionic polyelectrolytes: a surfactant head group contribution. *Progr. Colloid Polym. Sci.* 122:37-46.

Bergersen, F.J.; M.B. Peoples; M.N. Sudin, and G.L. Tuerner. (1988). ^{15}N -Isotope methodologies for measurement of biological nitrogen fixation. Rubber Research Institute of Malaysia. Kuala Lumpur, Malaysia. 50 pp.

Bolsman T., A.B.M.; F.T.G. Veltmaat, and N.M. van Os. (1988). The effect of surfactant structure on the rate of oil solubilization into aqueous surfactant solutions. *JAOCS* 65(2):280-283.

- Chappell, M.A.; D.A. Laird; M.I. Thompson, and V.P. Evangelou. (2005). Cosorption of atrazine and a lauryl polyoxyethylene oxide nonionic surfactant on smectite. *J. Agric. Food Chem.* 53:10127-10133.
- COSMOCEL. (2008). INEX-A: El surfactante por excelencia. Ficha técnica COSMOCEL. San Nicolás de Los Garza, NL., México.
- FAO/IAEA. (1988). Maximizing the efficiency of fertilizer use by grain crops. FAO Fertilizer and Plant Nutrition Bulletin 3. Rome, Italy. 30 pp.
- Kessler, M.J. (1988). Liquid scintillation analysis: Science and technology. PACKARD Instruments Co., Inc. Downers, Illinois, USA. 1-1/7-9 pp.
- Knowles, D.A. (1995). Preservation of agrochemicals. *In: Preservation of Surfactant Formulations.* Morpeth FF (Ed.). Blackie Academic & Professional, London, UK. pp. 119-146.
- Kwak, J.C.T. (1998). Polymer-surfactant systems. Surfactant science series, Vol. 77. Dekker, NY, USA.
- Marschner, H. (1985). Mineral nutrition of higher plants. Academic Press. San Diego, CA, USA. 339 pp.
- Nitschke, M. and G.M. Pastore. (2002). Biosurfactantes: Propiedades e aplicaciones. Quim. Nova 25(5):772-776.
- Olivares-Sáenz, E. 1993. Paquete de diseños experimentales Versión 2.4. Facultad de Agronomía de la Universidad Autónoma de Nuevo León. Marín, NL., México.
- Sebastianelli, A. (1990). FAO/OIEA Guía práctica para conteo por centelleo líquido y autoradiografía. Trabajos Prácticos para Becados. Seibersdorf, Austria. 31 pp.
- Schönherr, J. and P. Baur. (1994). Modelling penetration of plant cuticles by crop protection agents and effects of adjuvants on their rates of penetration. *Pestic. Sci.* 42, 185-208.
- Sprangle, P.; W.F. Meggit and D. Penner. (1975). Absorption, action, and translocation of glyphosate. *Weed Sci.* 23:235-240.
- Vera-Núñez, J.A.; F.C. Alvarez Villanueva; T. Muraoka y J.J. Peña-Cabriales. (2000). Protocolos del Taller sobre el Uso de ^{32}P en Estudios Suelo-Planta. 14-18 Agosto, 2000. Lab. Microbiología Ambiental del CINVESTAV-IPN, U. Irapuato. Irapuato, Gto., México.
- Werkheisser, W.O. and S.J. Anderson. (1996). Effect of soil properties and surfactants on pirimisulfuron sorption. *J. Environ. Qual.* 25:809-814.

Westwood, F.; K.M. Bean; A.M. Dewar; M.H. Bromilow and K. Chamberlain. (1998). Movement and persistence of ¹⁴C-Imidacloprid in sugar-beet plants following application to pelleted sugar beet seed. *Pestic Sci.* 52:97-103.

Zapata, F. and H. Axmann. (1991). Agronomic evaluation test of rock phosphate materials by means of radioisotope techniques. *Pédologie* XLI:291-301.