

Evaluación de la adición de zeolitas al suelo como factor para mitigar la contaminación producto de la fertilización agrícola*

Fáber de Jesús Chica Toro¹

Línea de investigación: Tratamiento de aguas. Grupo de Investigación GAMA y Semillero SIGMA.

Evaluation of the addition of zeolites to the soil as a factor to reduce the contamination caused by agro cultural fertilization

Avaliação da adição de zeolitas ao solo como fator para mitigar a contaminação produto da fertilização agrícola

RESUMEN

Introducción. Existen varias causas por las cuales los agroecosistemas son ineficientes y, en consecuencia, altamente contaminantes.

Objetivo. Evaluar si la retención de iones en el suelo aumenta con la adición de zeolitas, y si esta reacción depende de la interacción entre el suelo y la dosis utilizada.

* Investigación financiada con apoyo del Fondo de Fomento a la investigación de la Corporación Universitaria Lasallista

¹ Ingeniero agrónomo, Magíster en Ciencias Agrarias de la Universidad Nacional de Colombia. Investigador del Grupo de GAMA y docente de la Corporación Universitaria Lasallista.

Correspondencia: Fáber de Jesús Chica Toro, e-mail: f2chica@hotmail.com

Fecha de recibo: 15/06/2007; fecha de aprobación: 07/08/2008



Materiales y métodos. A suelos provenientes de Apartadó, El Retiro y Venecia se les adicionaron cuatro dosis de zeolita y una fuente de fertilizante. Se evaluó el efecto de las diferentes dosis de arcilla sobre los diferentes tipos de suelo, para retener iones a través del tiempo, mediante la medición de la conductividad eléctrica en los lixiviados.

Resultados. Para los suelos de Venecia y de El Retiro la dosis de zeolita que mayor retención presentó a través del tiempo fue la de 10 ton ha⁻¹. Para el suelo de Apartadó, la adición de zeolitas, según esta investigación, no aumentó la retención iónica en el suelo.

Conclusión. Los resultados evidencian que existe interacción entre el suelo y la dosis de zeolita, a través del tiempo.

Palabras clave: Zeolita. Contaminación. Suelo. Agua. Fertilizante.

ABSTRACT

Introduction. There are several causes by which agroecosystems are inefficient and, as a consequence, they are very polluting.

Objective. To evaluate if the ion retention in the soil increases with the addition of zeolites, and if this reaction depends on the interaction between the soil and the dose used.

Materials and methods. Soil samples were brought from Apartadó, El Retiro and Venecia, and four doses of zeolite with a fertilizer source were added to them. The effect of the doses of clay was evaluated in each soil type, in order to retain ions throughout the time by measuring the electric conductivity in the leachate samples.

Results: For the soils from Venecia and El Retiro the dose of zeolite with the highest retention rate throughout the time was that of 10 ton hectare⁻¹. For the soil from Apartadó, the addition of zeolites, according to this research, did not increase the ionic retention of the soil.

Conclusion. The results demonstrate the interaction that exists between the soil and the dose of zeolite throughout time.

Key words: Zeolite. Contamination. Soil. Water. Fertilizer.

RESUMO

Introdução. Existem várias causas pelas quais os agro-ecossistemas são ineficientes e em consequência, altamente contaminantes.

Objetivo. Avaliar se a retenção de íons no solo aumenta com a adição de zeolitas, e se esta reação depende da interação entre o solo e a dose utilizada.

Materiais e métodos. Os solos provenientes de Apartadó, O Retiro e Veneza se lhes adicionaram quatro doses de zeolita e uma fonte de fertilizante. Avaliou-se o efeito das diferentes doses de argila, sobre os diferentes tipos de solo, para reter íons através do tempo, mediante a medição da condutividade elétrica nos lixiviados.

Resultados. Para os solos de Veneza e do Retiro a dose de zeolita que maior retenção apresentou, através do tempo foi a de 10 ton tem⁻¹. Para o solo de Apartadó, a adição de zeolitas, segundo esta investigação, não aumento a retenção iônica no solo.

Conclusão. Os resultados evidenciam que existe interação entre o solo e a dose de zeolita, através do tempo.

Palavras chave: Zeolita. Contaminação. Solo. Água. Fertilizante

INTRODUCCIÓN

Disminuir la hambruna significa proveer de alimentos a toda la humanidad. Para lograrlo se deben alcanzar altas producciones, bien sea aumentando el área explotada o incrementando el rendimiento en las ya existentes, premisa fundamental de la revolución verde. En ambos casos, ello significa agroecosistemas altamente exigentes en subsidios energéticos, como los agroquímicos y, entre ellos, los fertilizantes. Éstos últimos, sobre todo en zonas de alta precipitación como el trópico, suelen pasar casi directamente a través del suelo a las aguas subsuperficiales-acuíferos, convirtiéndose en fuente de contaminación hídrica ya que el recurso edáfico se considera como un manto transmisor de agua y, en tanto, regulador del ciclo hidrológico¹, además de ser un filtro natural esencial para la purificación del recurso agua².

Los nutrientes suministrados a las plantas a través de los fertilizantes deben almacenarse en el suelo. De lo contrario se tienen sistemas productivos de baja eficiencia, bien sea porque se deben aportar grandes cantidades, lo cual además lo haría muy costoso; o porque lo que se suministra se fija o se lixivia.

Existen varias causas por las cuales los agroecosistemas son ineficientes y, en consecuencia, altamente contaminantes. La primera se refiere a la calidad, en términos de las propiedades físicas y químicas que posean los suelos. En general la retención de nutrientes en el suelo depende de la cantidad de cargas negativas por unidad de superficie que posea la fracción sólida de éste, denominada “capacidad de intercambio catiónico” (CIC)³. A mayor CIC, mayor retención, mayor disponibilidad de iones para las plantas y menor lixiviación de dichos iones. Otro aspecto importante se relaciona con la eficiencia de los fertilizantes. Varios autores⁴⁻⁶ aseguran que de los elementos suministrados, cerca del 50% y hasta un 70% salen del sistema suelo en los lixiviados antes de poder ser tomados por las plantas, debido a que éstas no los toman todos a un mismo tiempo y el suelo no es capaz de retenerlos para una continua absorción radicular.

Toda agua que pasa a través del perfil del suelo llegará necesariamente a convertirse en un lixiviado, el cual terminará vertiéndose en un acuífero o en aguas subterráneas, que a su vez enriquecerán otras fuentes. Así la calidad de los lixiviados determinará, finalmente, en gran medida la calidad del recurso hídrico. Al respecto existen reportes acerca de que la principal causa de contaminación de las aguas subterráneas en Galicia-España, son las actividades que vierten desechos como purines y fertilizantes⁷. En un estudio realizado por estos autores encontraron que de 70 muestras evaluadas, 16 superaron los umbrales de potabilidad permitidos de concentración de nitratos. Además, que el resto de las muestras están en

los niveles próximos de concentración considerados como perjudiciales para el ser humano.

La contaminación de las aguas subterráneas por nitratos es un problema ambiental asociado con la actividad agrícola. Esta afirmación se basa en los resultados obtenidos al aplicar dosis crecientes de fertilizante nitrogenado al cultivo de la papa (*Solanum tuberosum*). Al adicionar cuatro dosis al cultivo se encontró que la concentración de nitratos en los lixiviados fue proporcional a las dosis de fertilizantes evaluadas⁸.

Estudios realizados en el acuífero que abastece el acueducto de la ciudad de Puebla-México, y un distrito de riego de aproximadamente 82 000 hectáreas, arrojaron resultados negativos en cuanto a la calidad del agua extraída del subsuelo. Los investigadores reportan altos niveles de nitratos, hierro, materia orgánica, cobre, entre otros elementos, que califican como altamente contaminada el agua utilizada, tanto para la población, como para los cultivos⁹.

Las causas más frecuentes de contaminación se deben a las actividades antrópicas, que desarrolladas sin la necesaria planificación producen un cambio negativo de las propiedades del suelo¹⁰. De igual forma que el ser humano contamina, debe descontaminar y propender por la menor alteración de su entorno. Así, a la vez que se requiere crear mayor bienestar en términos de calidad de vida alimentaria, también se deben desarrollar alternativas que mitiguen las acciones nocivas producto de su propio desarrollo.

El planteamiento tendiente a optimizar los recursos utilizados para incrementar los rendimientos de una manera amigable con el medio ambiente sería aumentar la concentración de iones disponibles para la absorción de las plantas. Ello puede lograrse creando una malla molecular natural capaz de incrementar la CIC y, con ello, generar una mayor retención de iones en el suelo, lo cual generaría una reserva de elementos aprovechables para un óptimo desarrollo de las plantas, además de disminuir su concentración en los lixiviados que llegan hasta los acuíferos.

Así, resulta pertinente desarrollar investigaciones tendientes a crear condiciones físico-químicas en el suelo que procuren un manto edáfico eficaz en la utilización de los fertilizantes adicionados en las actividades agropecuarias. Una de las soluciones de mayor uso en la actualidad es la adición de zeolita, un aluminosilicato hidratado cristalino (arcilla) con estructuras tridimensionales, caracterizado por la habilidad de retener y liberar agua e intercambiar iones sin modificar su estructura atómica. Intercambia cationes como Ca^{++} , Mg^{++} , K^+ y NH_4^+ , así como diversos compuestos de fosfatos y materia orgánica. Posee una estructura tridimensional rígida (similar a un panal de abejas) conformado por una red de túneles interconectados creando un amplia área superficial para realizar el intercambio catiónico y la adsorción de humedad. Esta última puede entrar y salir de la armazón tridimensional sin variar la estructura de la arcilla⁵.

Ensayos realizados adicionando zeolita a la urea (fertilizante nitrogenado) evidenciaron que se puede lograr una reducción de las pérdidas de este elemento en más de un 30% sin afectar cultivos de tomate (*Lycopersicon esculentum* M.) y papa (*Solanum tuberosum*). Se evaluó el efecto de la aplicación de urea mezclada con zeolita al 15, 20 y 30%, frente a dosis de sólo urea. Se encontró que en todos los tratamientos la combinación zeolita + urea favoreció la acumulación de N en la planta hasta en un 26% al compararse con los tratamientos con sólo urea¹¹.

La adición de zeolitas a los suelos incrementa tanto la CIC como el pH en la mayoría de los casos en que es utilizada. Por ejemplo, medios ricos en zeolitas fueron adicionados a suelos ácidos podzólicos (arenosos) en Ucrania, en tasa de 0 a 37,5 Mg ha⁻¹. La adición de 35 Mg ha⁻¹ de zeolita incrementó la CIC de 6,1 cmol(+) kg⁻¹ a 11,2 cmol(+) kg⁻¹. Los rendimientos de papa (*Solanum tuberosum*), trigo (*Triticum vulgare* L.) y sorgo (*Sorghum vulgare* L.) se incrementaron hasta en un 79% frente a tratamientos sin adición de zeolitas¹². Estos mismos autores argumentan que la retención de agua por parte de las zeolitas coadyuva a disminuir la concentración de nitratos presentes en la lixiviación del suelo. En terrenos con aplicación de zeolita se observa una retención de los nitratos de hasta de 15 semanas, frente a las 5 semanas que es retenido por un terreno sin aplicación de zeolitas. Así se evidencia que la retención de agua por parte de la zeolita propicia un medio de mayor disponibilidad de nutrientes para las plantas, ya que el agua es el vehículo de transporte en la absorción radicular.

En el suelo no sólo se encuentran cantidades importantes de iones provenientes de los fertilizantes. Algunos agroquímicos tipo pesticidas, fungicidas, herbicidas, etc., contienen metales pesados que deterioran las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo. La adición de zeolita en cantidad de 2.5 g por cada 250 g de suelo es suficiente para remover la contaminación causada con P, Cu y Zn hasta niveles inocuos para plantas y otros organismos¹³.

Existen trabajos dirigidos a investigar la eficiencia de la zeolita ya no en el suelo, sino como filtro purificador de aguas provenientes de sistemas de alto consumo de agroquímicos. Aguas recogidas en la región de la quebrada La Aburrá del municipio de Medellín (Antioquia, Colombia) fueron tratadas con este mineral, encontrándose que la zeolita es altamente eficiente en la remoción de metales pesados y residuos de pesticidas presentes en las aguas residuales evaluadas¹⁴.

Esta investigación tuvo como objetivo evaluar si la retención de iones en el suelo aumenta con la adición de zeolitas, y si esta reacción depende de la interacción entre el suelo y la dosis utilizada, evaluando tal efecto a través del tiempo.

MATERIALES Y MÉTODOS

Localización. Se tomaron tres muestras de los primeros 20 cm de tres suelos en los municipios de Venecia, El Retiro y Apartadó, ubicados en el departamento de

Antioquia, Colombia. Las pruebas de laboratorio se llevaron a cabo en el campus universitario de la Corporación Universitaria Lasallista localizado en el municipio de Caldas, Antioquia, Colombia.

Metodología. Un diseño completamente al azar con un arreglo factorial 3 x 4, con seis medidas repetidas en el tiempo, permitió comparar el efecto de cuatro dosis de zeolitas (0, 10, 20 y 30 ton ha⁻¹), sobre la retención de iones en tres tipos de suelo: Tropet (Venecia), Udands (El Retiro) y Fluvent (Apartadó)¹⁵. Los resultados de los análisis de suelos se presentan en la Tabla 1.

Tabla 1. Resultado del análisis de suelos

Suelo	Textura				pH	% M.O	Al	Ca	Mg	K	CICE	P
	%A	%L	%Ar	Clase			dSm-1				Mg kg ⁻¹	
Retiro	80	12	8	AF	5.4	21.4	0.9	0.4	0.1	0.16	1.6	1
Venecia	52	20	28	FArA	4.4	2.6	6.4	3.4	0.9	0.24	10.9	3
Apartadó	22	46	32	FAr	5.1	2.2	1	5.9	9.2	0.21	16.3	2

Después de secar el suelo al ambiente se procedió a retirarle los cantos y partículas mayores de 2 mm, con el fin de garantizar un mayor contacto entre los sólidos del suelo y la zeolita. La unidad experimental constó de un matero plástico con dos kg de suelo creando una columna de 20 cm, con el propósito de simular la capa arable que se prepara en presiembra para la mayoría de los cultivos. A dicho matero se le adicionaron 1,5 g de un fertilizante compuesto por N, P y K (15-15-15) y las diferentes dosis de zeolita. Luego, una vez durante seis semanas, se adicionaron 750cm³ de agua desionizada para obtener el lixiviado. Cada unidad experimental se replicó cinco veces, para un total 60 materos.

Variable respuesta. La variable evaluada a través del tiempo fue la concentración de iones en el lixiviado, representados como la conductividad eléctrica (CE) y expresados en milisiemens por centímetro (mS cm⁻¹). Se realizaron seis mediciones con un conductivímetro multirango Hanna HI 9033[®].

Método estadístico. Se trabajó mediante un modelo de medidas repetidas en el tiempo con el "PROC MIXED" del SAS[®] versión 8.02, que considera tres tipos de estructura para la covarianza: simétrica compuesta, modelación no estructurada y autorregresiva de primer orden. La interacción entre los tratamientos y el tiempo resultó significativa. Se procedió a analizar los efectos simples, comparando tratamientos en tiempos específicos.

Las estructuras de covarianza fueron comparadas usando las pruebas de bondad de ajuste o los criterios de información que se generan para cada una de ellas. Los criterios calculados por la versión de SAS[®] 8.02 utilizada, son: criterio de información de Akaike (Akaike's Information Criterion -AIC-); criterio de información bayesiano de Schwarz (Schwarz's Bayesian Information Criterion -BIC-)

y resultado del log de verosimilitud multiplicado por -2 (-2 Res Log Likelihood); también incluye una versión del criterio de Akaike con una corrección por finitud muestral (Akaike's Information Criterion with Correction –AICC-). Como los criterios presentan siempre signos positivos, para la comparación de las estructuras ajustadas con base en estos valores debe tenerse en cuenta que, a menor valor, mejor será la estructura. Sin embargo, el mejor parámetro es el BIC, porque impone una corrección más severa¹⁶. Por lo tanto este fue el único parámetro que se consideró al realizar el análisis del modelo para la estructura de la autocorrelación de los errores.

Con base en el criterio de información bayesiano –BIC- se seleccionó el modelo con estructura autorregresiva de primer orden, que significa que existe una tendencia en las correlaciones de las observaciones dentro de cada unidad experimental, la cual es inversamente proporcional al espaciamiento en el tiempo.

Los efectos simples se analizaron mediante comparaciones de medias con el método de Tukey – Kramer, con un nivel de significancia de 0,05.

RESULTADOS

Se compararon tres modelos para determinar cuál estructura de la covarianza posibilita estimar los errores estándar adecuados para todas las comparaciones. En la Tabla 2 se presentan los resultados para el modelo autorregresivo que presentó los menores valores del criterio de selección.

Tabla 2. Resultado del análisis de la estructura de covarianza

Criterios de información	Estructura autorregresiva	Estructura simétrica
-2 Res Log Likelihood	-430,5	-430,0
AIC	-424,5	-426,0
AICC	-424,4	-425,9
BIC	-418,2	-421,8

El criterio de información más adecuado, de acuerdo con el menor valor arrojado (valor absoluto), fue el Bayesiano –BIC-. Acorde con éste se seleccionó el modelo con estructura autorregresiva de primer orden, que significa que existe una tendencia en las correlaciones de las observaciones dentro de cada unidad experimental, la cual es inversamente proporcional al espaciamiento en el tiempo. En la Tabla 3 se presenta el resultado del análisis de varianza para dicho modelo, la cual muestra que existen diferencias en los factores principales y en las interacciones, excepto para la interacción de segundo orden dosis * tiempo.

Tabla 3. Resultado del análisis de varianza para el modelo de covarianza seleccionado

Fuentes de variación	Grados de libertad	Valor de F	Valor de probabilidad
suelo	2	250,89	<0,0001
dosis	3	11,92	<0,0001
tiempo	5	29,45	<0,0001
suelo * dosis	6	2,97	0,0128
dosis * tiempo	15	1,65	0,0793
suelo * tiempo	10	88,35	<0,0001
suelos * dosis * tiempo	30	2,11	0,0045
ue	4	00,62	0,6482

La interacción de tercer orden (suelos * dosis * tiempo) resultó significativa. Así, es necesario analizar los efectos simples mediante la comparación de medias. Al realizar las comparaciones con el método de Tukey - Kramer, y con un nivel de significancia de 0,05, se encontró que las comparaciones con un valor de $p < 0,05$ son estadísticamente diferentes.

En las gráficas que siguen se puede apreciar el comportamiento de la conductividad eléctrica del suelo a través del tiempo, en respuesta a la adición de diferentes dosis de zeolita, en los municipios de Apartadó, El Retiro y Venecia.

Para el suelo del municipio de Apartadó se muestra una mayor retención iónica para todas las dosis utilizadas en los tiempos 4 y 6. Sin embargo, al evaluarlas a través del tiempo se evidencia que no hay diferencia significativa en la retención de iones para una misma dosis en los diferentes periodos medidos (Tabla 3, $p > 0,05$). Esto indica que la acción de la zeolita parece ejercerse de inmediato una vez adicionada a este suelo.

En la Tabla 3 se compara cómo se comporta del tratamiento testigo frente a las diferentes dosis evaluadas. Se observa que no existe, a través del tiempo, diferencia significativa entre adicionar zeolita y no hacerlo ($p > 0,05$). Ello indica que para el tipo de suelo evaluado del municipio de Apartadó la adición de zeolita no tiene efecto sobre la retención ión.

Gráficas. Comportamiento de la conductividad eléctrica del suelo a través del tiempo, en respuesta a la adición de diferentes dosis de zeolita, en los municipios de Apartadó, El Retiro y Venecia

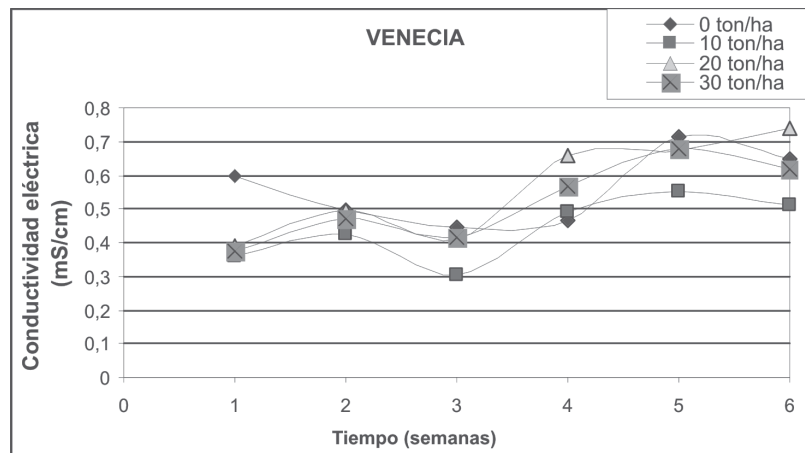
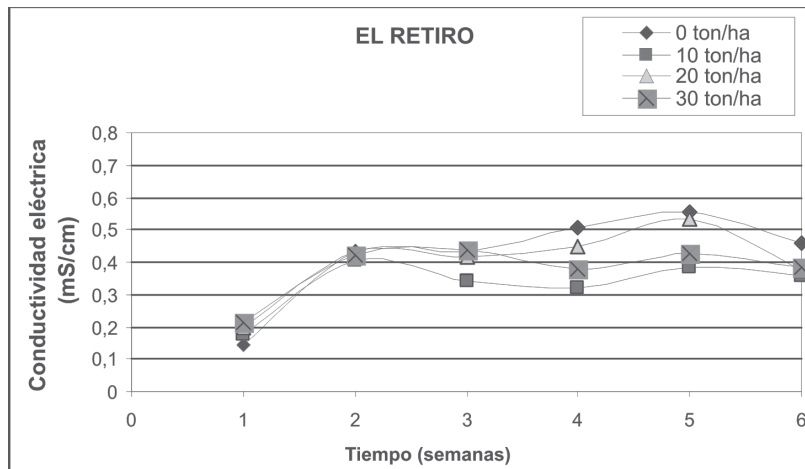
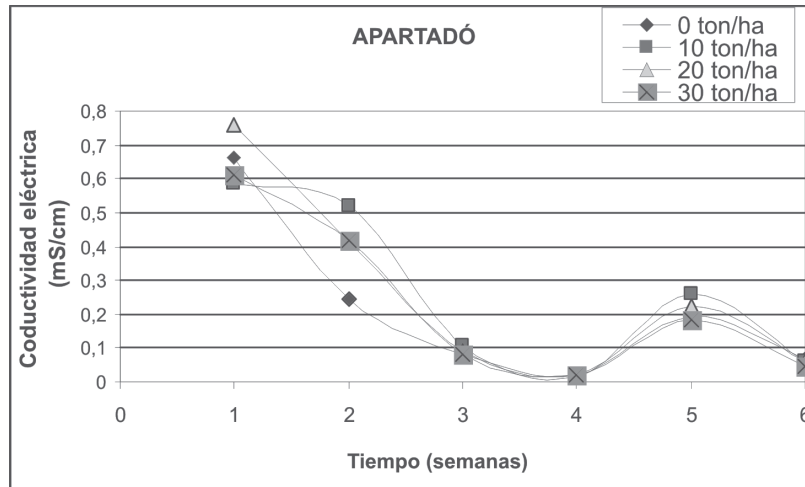


Tabla 3. Valor de probabilidad correspondiente a las diferentes dosis evaluadas a través del tiempo, para el suelo de Apartadó

Suelo	Dosis	Tiempo	Vs.	Suelo	Dosis	Tiempo	Valor p
A	10	1	Vs.	A	10	2	0,1186
						3	0,8081
						4	0,9730
						5	0,3048
						6	0,6501
	20	1			2	0,1201	
					3	0,2304	
					4	0,0622	
					5	0,0003	
	30	1			6	0,7585	
					2	0,3269	
					3	0,1558	
4			0,8444				
5			0,2429				
					6	0,7565	

Tabla 4. Comparación de las diferentes dosis contra el testigo, a través del tiempo, para el suelo de Apartadó

Suelo	Dosis	Tiempo	Vs.	Suelo	Dosis	Tiempo	Valor p
A	0	1	Vs.	A	10	1	1,0000
					20		1,0000
					30		1,0000
		2			10	2	1,0000
					20		0,1185
					30		1,0000
		3			10	3	1,0000
					20		1,0000
					30		1,0000
		4			10	4	0,6202
					20		1,0000
					30		0,9981
		5			10	5	0,7856
					20		1,0000
					30		0,9974
		6			10	6	1,0000
					20		1,0000
					30		1,0000

Según la Gráfica, para el suelo evaluado del municipio de El Retiro (R) la mayor retención iónica –menor conductividad eléctrica- se logra en el tiempo I. Para la mayoría de las dosis evaluadas la diferencia resultó significativa a través del tiempo (Tabla 4, $p < 0,05$). Ello indica que la máxima retención de iones se da inicialmente, una vez adicionada la zeolita, y que la retención va disminuyendo con el tiempo.

Observando la gráfica del comportamiento de la zeolita en el suelo de Apartadó se puede ver que inicialmente la zeolita, independientemente de la dosis, presenta una retención iónica similar, la cual va aumentando hasta el tiempo cuatro, para luego disminuir en el tiempo cinco y retomar mayores valores en el tiempo seis. Es posible evidenciar que la reacción de la zeolita con este tipo de suelos es prácticamente nula, al presentar menores valores de la variable respuesta –mayor retención edáfica- el tratamiento con 0 ton ha^{-1} , frente a los valores de los tratamientos en donde se adicionó zeolita. Este resultado indica que en suelos con texturas arcillosas, la zeolita no logra aumentar la retención iónica.

Tabla 4. Valor de probabilidad correspondiente a las diferentes dosis evaluadas a través del tiempo, para el suelo de El Retiro

Suelo	Dosis	Tiempo	Vs.	Suelo	Dosis	Tiempo	Valor p
R	10	I	Vs.	R	10	2	1,0000
						3	<0,0001
						4	<0,0001
						5	0,0006
						6	<0,0001
						6	<0,0001
	20				2	<0,0001	
					3	<0,0001	
					4	<0,0001	
					5	0,0003	
					6	<0,0001	
					6	<0,0001	
	30				2	0,5148	
					3	<0,0001	
					4	<0,0001	
					5	<0,0001	
					6	<0,0001	
					6	<0,0001	

En la Tabla 5 se observa que el valor de probabilidad resultante de la comparación de las dosis contra el testigo para un mismo tiempo, presenta valores mayores a 0,05; lo cual indica que no existe diferencia estadísticamente significativa entre la retención iónica de las diferentes dosis evaluadas y el testigo. Según estos datos la zeolita no causa ningún efecto significativo en la disminución de la concentración de iones en los lixiviados producidos por el lavado de este tipo de suelo.

La adición de zeolitas al suelo del municipio de El Retiro inicialmente no parece tener ningún efecto sobre una mayor retención de iones, presentando, todas las dosis de zeolitas, valores similares en la variable respuesta evaluada en el tiempo uno, incluida el testigo de 0 ton ha⁻¹. Sin embargo, la dosis de 10 ton ha⁻¹ de zeolita evaluada al final del tiempo –semana seis- resulta ser la de mayor retención (ver gráfica). Es posible que para las condiciones texturales de este suelo (ver tabla 1) se requiera de un mayor tiempo para que la zeolita adicionada inicie el proceso de adsorción. Ello puede estar, además, condicionado por la cantidad elevada de materia orgánica presente, en tanto ésta, con su alta higroscopicidad, no deja agua libre para que exista solución del suelo suficiente que le llegue a la zona de adsorción de la zeolita. Así se requiere de mayor tiempo para que, una vez saturada la materia orgánica, quede agua disponible para que el complejo de adsorción de la arcilla inicie su actividad.

Tabla 5. Comparación de las diferentes dosis contra el testigo, a través del tiempo, para el suelo de El Retiro

Suelo	Dosis	Tiempo	Vs.	Suelo	Dosis	Tiempo	Valor p
Testigo de El Retiro	0	1	Vs.	R	10	1	0,1096
					20		1,0000
					30		0,3350
		2			10	2	0,3951
					20		1,0000
					30		1,0000
		3			10	3	1,0000
					20		1,0000
					30		1,0000
		4			10	4	1,0000
					20		1,0000
					30		1,0000
		5			10	5	1,0000
					20		1,0000
					30		1,0000
		6			10	6	1,0000
					20		1,0000
					30		1,0000

En la gráfica correspondiente al suelo del municipio de Venecia (V) se observa que, excepto para los tiempos 4 y 6, todas las dosis evaluadas presentan mayor retención comparadas contra el testigo. No obstante, estadísticamente no existe diferencia significativa al comparar el valor P del tratamiento testigo contra el valor P de cada una de las dosis evaluadas de zeolita (Tabla 6, valor $p > 0,05$).

Tabla 6. Comparación de las diferentes dosis contra el testigo, a través del tiempo, para el suelo de Venecia

Suelo	Dosis	Tiempo	Vs.	Suelo	Dosis	Tiempo	Valor p
Venecia	0	1	Vs.	V	10	1	0,0943
					20		0,2870
					30		0,1768
		2			10	2	0,9956
					20		1,0000
					30		1,0000
		3			10	3	0,9605
					20		1,0000
					30		1,0000
		4			10	4	1,000
					20		0,5311
					30		1,0000
		5			10	5	0,8844
					20		1,0000
					30		1,0000
		6			10	6	0,9953
					20		1,0000
					30		1,0000

Para el suelo evaluado del municipio de Venecia, a través del tiempo, la reacción de la zeolita evidencia que la dosis de 10 ton ha⁻¹ no presentó variación estadísticamente significativa durante las 6 semanas de mediciones. Ello indica que esta dosis ejerce su efecto de retención iónica una vez se adiciona al suelo (Tabla 7, valor $p > 0,05$). La dosis de 20 ton ha⁻¹ presenta otro tipo de comportamiento: hasta la semana 3 logra su mayor retención iónica y de ahí en adelante disminuye drásticamente con respecto a su retención en las semanas 1, 2 y 3 (ver gráfica y la tabla 7). Es posible que esta diferencia en tiempo sea el que la dosis de zeolita demore en saturarse.

Para el suelo de Venecia, se aprecia en la gráfica que la adición de zeolitas al principio, independientemente de la dosis utilizada, redundó en una mayor retención de iones en el suelo al presentar menores valores de conductividad eléctrica en el lixiviado, comparados con el tratamiento testigo de 0 ton ha⁻¹. Este resultado coincide con investigaciones realizadas por varios autores^{6,9,11}, en el sentido que, mediante el uso de zeolita, se logra retener mayor cantidad de nutrientes en el suelo. Así estadísticamente no exista diferencia, es posible deducir que para este tipo de suelo evaluado la mayor retención de iones, a través del tiempo, se puede lograr adicionando 10, 20 ó 30 ton ha⁻¹, pero, económicamente, la dosis de 10 ton ha⁻¹ resultaría la más viable de utilizar.

Tabla 7. Valor de probabilidad correspondiente a las diferentes dosis evaluadas a través del tiempo, para el suelo de Venecia

Suelo	Dosis	Tiempo	Vs.	Suelo	Dosis	Tiempo	Valor p
R	10	I	Vs.	V	10	2	1,0000
						3	1,0000
						4	0,9959
						5	0,5672
						6	0,9520
	20				2	1,0000	
					3	1,0000	
					4	0,0166	
					5	0,0065	
					6	<0,0001	
	30				2	1,0000	
					3	1,0000	
					4	0,5425	
					5	0,0027	
					6	0,0700	

La Tabla 8 evidencia que el comportamiento de la zeolita no es igual en los tres tipos de suelos evaluados. Excepto en el tiempo 2 y 5, el suelo evaluado del municipio de El Retiro presentó una mayor retención iónica que el suelo evaluado del municipio de Apartadó. Así mismo, el suelo evaluado del municipio de El Retiro presentó diferencia significativa (valor $P < 0.05$), para los tiempos 3, 4, 5 y 6, cuando se comparó contra el suelo evaluado del municipio de Venecia. Entre los suelos evaluados de los municipios de Apartadó y Venecia no se presentó diferencia estadísticamente significativa (Tabla 8).

Tabla 8. Comportamiento de la zeolita en los tres suelos evaluados

Suelo	Dosis	Tiempo	Vs.	Suelo	Dosis	Tiempo	Valor p
A	10	I	Vs.	V	10	I	0,5998
				R			<0,0001
				V	20		0,6139
				R			<0,0001
				V	30		0,8775
				R			<0,0001

Tabla 8. Comportamiento de la zeolita en los tres suelos evaluados (cont.)

Suelo	Dosis	Tiempo	Vs.	Suelo	Dosis	Tiempo	Valor p
A	10	2	Vs.	V	10	2	1,0000
				R			1,0000
	20			V	20		1,0000
				R			1,0000
	30			V	30		1,0000
				R			1,0000
A	10	3	Vs.	V	10	3	1,0000
				R			0,0144
	20			V	20		1,0000
				R			0,0006
	30			V	30		1,0000
				R			<0,0001
A	10	4	Vs.	V	10	4	0,7856
				R			0,0021
	20			V	20		0,3046
				R			<0,0001
	30			V	30		0,5922
				R			<0,0001
A	10	5	Vs.	V	10	5	0,8944
				R			0,9983
	20			V	20		0,3046
				R			0,0012
	30			V	30		0,0597
				R			<0,0636
A	10	6	Vs.	V	10	6	0,9332
				R			0,0038
	20			V	20		<0,0001
				R			0,0011
	30			V	30		0,1183
				R			0,0002
V	10	1	Vs.	R	10	1	0,2001
	20			R	20		0,1505
	20			R	30		0,1021
V	10	2	Vs.	R	10	2	1,0000
	20			R	20		1,0000
	30			R	30		1,0000
V	10	3	Vs.	R	10	3	0,4729
	20			R	20		0,0010
	30			R	30		0,0003

Tabla 8. Comportamiento de la zeolita en los tres suelos evaluados (cont.)

Suelo	Dosis	Tiempo	Vs.	Suelo	Dosis	Tiempo	Valor p
V	20	4	Vs.	R	20	4	<0,0001
	30			R	30		<0,0001
V	10	5	VS.	R	10	5	<0,0001
	20			R	20		<0,0001
	30			R	30		<0,0001
V	10	6	VS.	R	10	6	<0,0001
	20			R	20		<0,0001
	30			R	30		<0,0001

DISCUSIÓN

El comportamiento de la zeolita no es el mismo para cualquier tipo de suelo, no obstante que estadísticamente no se presentó diferencia significativa entre adicionar o no zeolita para aumentar la retención iónica en los suelos evaluados. En regiones en donde se presenten suelos con características similares a los de los suelos evaluados de los municipios de El Retiro y Venecia, es posible que mediante la adición de zeolitas se aumente la retención iónica. Ello no ocurriría para el caso de suelos con características similares a las presentadas por el suelo evaluado del municipio de Apartadó.

La zeolita presenta una mayor retención en suelos con texturas arenosas. En suelos con texturas arcillosas, la zeolita no parece tener mayor efecto en aumentar la retención iónica.

La retención de iones en el suelo no es directamente proporcional a la dosis de zeolita utilizada, encontrándose que para los suelos evaluados de los municipios de El Retiro y de Venecia, la mayor retención se logra con la menor dosis de zeolita utilizada.

Para los tres suelos evaluado, la mayor retención se logró durante las primeras cuatro semanas después de adicionada la zeolita.

Basados en los resultados obtenidos en esta investigación, no es posible categorizar sobre el comportamiento de la zeolita frente a la retención iónica en el suelo. Es recomendable, en tanto, ampliar este trabajo abarcando una mayor cantidad de órdenes de suelos y, dentro de ellos, varias clases texturales.

REFERENCIAS

1. CLEAR AIR TECHNOLOGY CENTER (CATC). [online]. s.l. : EPA, 1999. [consultada el 21 de octubre de 2005]. Disponible en <http://www.epa.gov/ttn/catc>

2. SCHLESINGER, W. H. Biogeoquímica, un análisis del cambio global. Barcelona, España: Ariel S.A., 2000. 579 p.
3. BOHN, H. L.; McNEAL, B. L. y O'CONNOR, G. A. Química del suelo. México: Limusa, 1979. 360p.
4. BERTSCH, F. La fertilidad de los suelos y su manejo. . San José, Costa Rica: Asociación Costarricense de la Ciencia del Suelo, 1998. 163 p.
5. DOUGLAS, W. M. Natural zeolitas: ocurrente, properties, applications. In: Review in MINERALOGY & GEOCHEMISTRY. Mineralogical Society of America, Geochemical Society. Vol. 45 (2001).
6. BARBER, S. A. Soil nutrient bioavailability, a mechanistic approach. New Yor, U.S.A.: John Wiley & Sons, 1995. 414p.
7. MOLINEIRO, H. J.; SORIANO, H. G. y SAMPER C. J. . Calidad y contaminación de las aguas subterráneas en Galicia: situación actual y estudio de detalle en la cuenca del Valiñas. [online]. Galicia: IGME, 1998. [consultada el 22 de octubre de 2005]. Disponible en <http://www.aguas.igme.es/igme/publica/pdf/lib3/molineiro.pdf>
8. ADROVER, F. M. et. Al. 2003. Fertilización nitrogenada en el cultivo de la patata y contaminación de aguas subterráneas. [online]. España: s.n., 2003. [consultada el 22 de octubre de 2005]. En Disponible en http://www.us.es/ciberico/archivos_acrobat/sevilla
9. DOMÍNGUEZ-MARIANI, E. y CARRILLO-CHÁVEZ, A. Reuso de agua residual en el distrito de Velsaquillo, Puebla. [online]. Puebla: s.n., s.f. [consultada el 04 de julio de 2006]. Disponible en <http://www.ugm.org.mx/pdf/geos02-2/GGA02-02.pdf>
10. GARCÍA, I. Contaminación del suelo e impacto ambiental. [online]. Puebla: s.n., s.f. [consultada el 04 de julio de 2006]. En <http://www.edafologia.ugr.es/conta/tema11/concep.htm>. (consultada el 25 de octubre de 2005).
11. JOHN, C. M. DEL VALLÍN, G. y DUEÑAS, G. Eficiencia de la zeolita como aditivo de la urea en los cultivos de papa y tomate. [online]. Cuba: s.n., s.f. [consultada el 19 de julio de 2006]. Disponible en <http://www.cursosenlinea.cu/eventosv/tecnomat/compuesto/Eficiencia%20de%20zeolita%20como%aditivo%20de%20la%urea.doc>.
12. DE LA TORRE SÁNCHEZ, M. L. GRANDE GIL, J. A. y SAINZ SILVAN. Uso de zeolitas en plantaciones de alto rendimiento como mejorante del suelo. [online]. España: Estremadura Web, s.f. [consultada el 09 de enero

de 2006]. Disponible en <http://www.estremadura-web.com/olivarintensivo/modules.php>.

13. BUSTAMANTE ATEHORTUA, P. Pelletización y evaluación de zeolita NA-A para su aplicación como adsorbente intercambiador iónico. 2000, Medellín, Colombia. 101 p. Trabajo de grado (Ingeniera química). Universidad Pontificia Bolivariana.
14. ESCOBAR HIGUITA, L. M.; KUAN DUQUE, Y. C. y LÓPEZ CAMPUZANO, D. M. Recuperación de aguas contaminadas por agroquímicos provenientes de las veredas de la regional de La Aburra para su reúso o disposición final. 2002, Medellín, Colombia. 120 p. Trabajo de grado (Ingeniera química). Universidad Pontificia Bolivariana.
15. DEPARTMENT OF AGRICULTURE OF UNITED STATES, USDA. Keys to Soil Taxonomy. Eight Edition. United States: Department, 1998.
16. LITTELL, R. C; HENRY, P. R AND AMMERMAN, C. B. Statistical analysis of repeated et measures using SAS procedures. In: Journal of animal sciences. 76 (1988); p. 1216-1231.