

MOVIMIENTO Y NITRIFICACION DE FERTILIZANTES NITROGENADOS EN ALGUNOS SUELOS DE MEXICO

Por Alfredo Echeagaray Alemán, Enrique Ortega Torres
y Nicolás Aguilera

El estudio sobre el movimiento, la nitrificación y las posibles pérdidas de nitrógeno de tres fertilizantes (urea, sulfato de amonio y nitrato de amonio) bajo condiciones de laboratorio de tres suelos del Estado de México y uno del estado de Sonora, indican que el amonio se localiza en la capa superficial del suelo, los nitratos se mueven rápidamente, siendo percolados sin dificultad y el nitrógeno uréico ocupa una posición media en cuanto a su facilidad de percolación.

El nitrógeno es uno de los constituyentes principales de la materia viva, y es nutriente esencial para los vegetales que lo asimilan en la forma de iones nitrato y amonio. Es un elemento mundialmente deficiente en el suelo, ya que por lo general existe escasamente y es removido en grandes cantidades por los cultivos, además de perderse con facilidad en el suelo, por lixiviación, erosión y volatilización.

En el suelo el nitrógeno sufre una serie de reacciones bioquímicas sucesivas complejas reversibles y que en conjunto constituyen el llamado "Ciclo del Nitrógeno", fenómeno que ha sido estudiado extensamente durante los últimos años, conociéndose muchos aspectos, pero no sabiéndose con certeza otros.

El cultivo intensivo del suelo y el uso de variedades híbridas ha agudizado el problema de la falta de nitrógeno y otros nutrientes en el suelo, por lo cual ha sido necesario recurrir al uso de fertilizantes en gran escala. Cuando un fertilizante nitrogenado se agrega al suelo, es importante estudiar su velocidad de nitrificación, su efecto en la reacción del suelo y su facilidad de percolación. En el Valle del Yaqui, Sonora, algunos agricultores acostumbran emplear la urea como fuente de nitrógeno.

El presente trabajo se efectuó con el fin de obtener información acerca del movimiento, nitrificación y posibles pérdidas de nitrógeno, de tres fertilizantes nitrogenados (urea, sulfato de amonio y nitrato de amonio), bajo condiciones de laboratorio, al ser agregados a cuatro suelos provenientes de distintas zonas agrícolas de México.

Antecedentes bibliográficos

Cuando se agrega un fertilizante al suelo, su valor depende de varios factores, entre los cuales se tienen: los cambios químicos que sufra, el aprovechamiento de los productos de su transformación por las plantas, y los efectos de estos productos en el suelo. La urea, como fertilizante nitrogenado, fue introducida comercialmente en el campo en los Estados Unidos, el año de 1935.²⁷ Su nitrógeno, aunque se encuentra en forma orgánica, es soluble en agua y rápidamente convertible a nitratos en el suelo, sin dejar productos tóxicos para las plantas.¹⁹

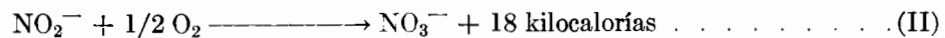
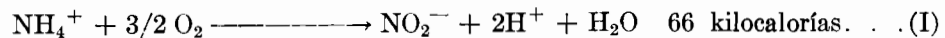
Por lo que respecta a su facilidad de percolación en el suelo, se le ha considerado con un comportamiento muy semejante al de los nitratos;²⁹ sin embargo, existen

datos en la literatura que indican que su movimiento a través del perfil del suelo es menor.^{2, 5, 28, 30} Al adicionarse urea al suelo, ésta se hidroliza rápidamente y uno de los productos resultantes de dicha hidrólisis es el amoníaco, el cual es inmediatamente absorbido por el complejo de intercambio de bases, lo que evita, dentro de ciertos límites y condiciones edáficas, su pérdida por lixiviación.

Cuando se aplica urea al suelo, se hidroliza muy rápidamente y, según el trabajo de Broadbent,³ de 200 a 400 partes por millón de nitrógeno de urea son transformadas a amonio a una temperatura de 10°C después de 7 días. La velocidad de hidrólisis es favorecida por el aumento de temperatura y resulta muy rápida a 37°C. Al formarse grandes cantidades de amonio el pH del suelo aumenta y la velocidad de hidrólisis puede ser tan rápida que se pierde amoníaco por volatilización a la atmósfera. Estas pérdidas pueden ser fuertes cuando la capacidad de intercambio de bases del suelo es baja, la temperatura del suelo es alta,^{6, 7} o cuando la urea se aplica en la superficie del suelo.

El amoníaco formado por la hidrólisis de la urea, es la forma de nitrógeno mineral más reducida y es a su vez el punto de partida para la formación biológica de nitritos y nitratos. Varias teorías químicas han sido sugeridas para explicar el fenómeno de la nitrificación en la naturaleza, siendo Pasteur³² el primero en indicar que el proceso de nitrificación es de naturaleza microbiológica.

Bajo ciertas condiciones, en el proceso de la nitrificación pueden distinguirse dos etapas distintas, las cuales pueden ser representadas por las reacciones siguientes:



Los microorganismos responsables de la reacción (I) pertenecen a 5 géneros de bacterias con diferentes especies: *Nitrosomonas*, *Nitrosococcus*, *Nitrosospira*, *Nitrosocystis* y *Nitrosoglea*. La segunda reacción es llevada a cabo por 2 géneros de bacterias con varias especies: *Nitrobacter* y *Nitrocystis*.^{14, 17} De todos estos microorganismos, las más frecuentemente encontradas en el suelo son *Nitrosomonas* y *Nitrobacter*.

Diferentes factores físicos y químicos del suelo afectan la velocidad de oxidación del amonio y los nitritos, pudiéndose citar entre los principales a los siguientes: reacción del suelo, aereación, temperatura, humedad, cantidad de materia orgánica y concentración de sustancias inorgánicas presentes en el suelo, tipo de cultivo, etc. En numerosas investigaciones se ha demostrado que existe una correlación significativa entre la producción de nitratos y el pH del suelo.

Estos organismos dependen, para subsistir, de una reacción de oxidación, siendo por lo tanto estrictamente aeróbicos y por esta característica nutricional, uno de los factores más importantes en el proceso de la nitrificación en los suelos agrícolas es su estructura.

Otro de los factores que afectan marcadamente la nitrificación, es la temperatura del suelo. Muchos investigadores han encontrado que a temperaturas menores de

5°C y mayores de 40°C, la velocidad de nitrificación es muy lenta,^{8, 22} considerándose la temperatura óptima entre 30 y 35°C.

Debido a que la humedad afecta la aereación del suelo, el contenido de agua tiene una influencia marcada en la formación de nitratos. El nivel óptimo de humedad varía considerablemente en los suelos, pero en general se considera que a un medio o dos tercios de la capacidad de campo, la formación de nitratos es rápida y eficiente. El contenido y tipo de materia orgánica natural del suelo tiene un efecto favorable en la nitrificación.¹¹

Entre las sales inorgánicas necesarias para las bacterias nitrificantes, se han mencionado: ¹⁶ el calcio, el fósforo, el magnesio y el hierro, existiendo evidencias ¹³ de que el cobre es esencial para su metabolismo.

Las prácticas culturales de un terreno agrícola, así como el tipo de cultivo, pueden favorecer el número y actividad de la flora nitrificante, y consecuentemente el proceso de la nitrificación.^{4, 33, 34}

Numerosos investigadores ^{12, 15, 31} concuerdan en que bajo condiciones normales del suelo, el amoníaco se volatiliza rápidamente. Dichos autores concluyen los puntos siguientes: 1) Las pérdidas son pequeñas a un pH de 6.0 a 7.0, siendo mayores al aumentar el pH del suelo; 2) las pérdidas pueden ser grandes en suelos alcalinos secos que contengan bastante amoníaco cerca de la superficie; 3) las pérdidas son mayores en suelos con una capacidad de intercambio de bases bajas, y 4) las pérdidas son altas cuando se descomponen materiales orgánicos nitrogenados en o cerca de la superficie del suelo.

Van Schreven²⁴ informa que las pérdidas de amoníaco, cuando se agregan fertilizantes nitrogenados en los suelos de Holanda, dependen de la clase de dichos fertilizantes.

En sus experimentos de nitrificación, Broadbent³ señala una formación de 7.6 ppm de nitratos por día, a partir del sulfato de amonio en un suelo arenoso-limoso; en cambio, en un suelo arcilloso de pH de 8.1, encuentra formación de 13.6 y 9.9 ppm de nitratos por día, a partir del sulfato y nitrato de amonio, respectivamente.

En México se han hecho escasos estudios acerca de la capacidad de nitrificación de los suelos, encontrándose en la literatura los trabajos de nitrificación de los suelos del Lago de Texcoco hechos por Sánchez Marroquín y colaboradores,²³ quienes encuentran un poder de nitrificación bueno para ciertos suelos del Lago; el trabajo de Ortega¹⁸ sobre el poder nitrificante de los suelos de Sonora, y recientemente, el estudio de un método de incubación para medir la velocidad de nitrificación en los suelos de Veracruz y El Bajío, hecho por León Vallejo y Aguilera.

Materiales y métodos

Para el muestreo de los suelos se procedió a hacer pozos con una profundidad de 2 m, tomando muestras representativas de suelo cada 10 cm. Los pozos tuvieron las siguientes localizaciones:

Pozo Núm. 1. "El Crucero." Amecameca, Edo. de México.

Pozo Núm. 2. "Tlapanchola del Moral." Cocotitlán, Edo. de México.

Pozo Núm. 3. "Requena." Juchitepec, Edo. de México.

Pozo Núm. 4. "Valle del Yaqui." Ciudad Obregón, Sonora.

Muestras. Las muestras de suelo fueron secadas al aire, molidas y tamizadas a través de un tamiz del número 20.

Determinación de la humedad de campo. Se determinó la humedad de campo de la muestra de suelo, con el objeto de conocer la cantidad mínima de agua en la que debía disolverse el fertilizante nitrogenado, asegurando su óptima distribución en toda la columna del suelo. El método utilizado fue el de Wilcox.³⁷

Textura. La determinación de la textura se hizo por el método modificado de Bouyoucos.⁹

pH. El pH de los suelos se midió con el potenciómetro Beckman Modelo H-2 con electrodos de calomel y vidrio, tomando una relación de suelo-agua de 1:2, agitando perfectamente bien y dejando en reposo a temperatura de laboratorio durante media hora.

Determinación de la materia orgánica. La determinación de la materia orgánica se hizo siguiendo el método de Walkley y Black.³⁵

Columnas de percolación. Se cortaron secciones cilíndricas de material de vidrio y plástico de 5 cm de longitud y 3.5 cm de diámetro. Las secciones de vidrio fueron pegadas con cemento "Duco Dupont" y las de plástico con acetona. De esta manera se construyeron las columnas con una longitud aproximada de 50 cm.

El suelo en estudio se colocó en la columna de tal forma que cada sección de ella correspondiera a la muestra de suelo tomada a cada 10 cm de profundidad. Se montaron dos columnas para cada muestra de suelo: en una de ellas, considerada como control, se hizo percolar únicamente agua destilada; en la otra, la solución acuosa del fertilizante nitrogenado. En todos los casos las columnas fueron desmontadas 48 horas después, procediéndose a determinar su contenido de nitrógeno total y nitrógeno amoniacal.

A las distintas muestras de suelo colocadas en las columnas se les hizo percolar, a través de ellas, soluciones acuosas de fertilizantes nitrogenados (urea, sulfato de amonio y nitrato de amonio) con una concentración equivalente a 150 ppm de nitrógeno. A las 48 horas se desmontaron las columnas y el contenido de cada sección fue colocado en un vaso de precipitado. Se procedió a hacer la extracción de las dos formas de nitrógeno (total y amoniacal), para lo cual se les añadió 50 ml de una solución extractora (compuesta de NaCl 1N y HCl 0.1N⁹). Se agitó durante 10 minutos y se filtró a través de un embudo de filtración de vacío. Posteriormente se pasaron 100 ml de la solución extractora, la cual fue añadida en pequeñas porciones. Se lavó el embudo de filtración con 50 ml de agua destilada. En el extracto del suelo obtenido se efectuaron las determinaciones de nitrógeno total y amoniacal por los métodos descritos a continuación: a) *Determinación del nitrógeno total.* El método utilizado es el de Kjeldahl modificado y descrito en el AOAC;¹ b) *Determinación del nitrógeno amoniacal.* Para esta determinación también se utilizó el método descrito en el AOAC;¹ c) *Cálculos.* Todos los cálculos fueron corregidos, al restarse del valor del nitrógeno total y amoniacal del suelo tratado con el fertilizante, el valor del nitrógeno total y amoniacal del suelo tratado con agua.

Nitrógeno de Urea

$$\begin{aligned} \text{Nitrógeno Total} &= \text{Nitrógeno Amoniacal} + \text{Nitrógeno Orgánico} \\ \text{Nitrógeno Orgánico} &= \text{Nitrógeno Total} - \text{Nitrógeno Amoniacal} \\ &(\text{representado por Urea}) \end{aligned}$$

Nitrógeno de Sulfato de Amonio

$$\text{Nitrógeno Amoniacal} = \text{Nitrógeno de } (\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$$

Nitrógeno de Nitratos

$$\begin{aligned} \text{Nitrógeno Total} &= \text{Nitrógeno Amoniacal} + \text{Nitrógeno de Nitratos} \\ \text{Nitrógeno de Nitratos} &= \text{Nitrógeno Total} - \text{Nitrógeno Amoniacal} \end{aligned}$$

Hidrólisis de la urea. El método que se empleó se basa en una modificación al método propuesto por Watt y Chrispp.³⁶

Nitrificación. El método utilizado para el estudio de la nitrificación fue el de Wilson.³⁸

En el filtrado obtenido, se hicieron las determinaciones de nitrógeno amoniacal, nitritos, y nitritos más nitratos, siguiendo el método de Olsen modificado por Richardson.²⁰

Determinación de nitritos. Los nitritos se determinaron empleando el método propuesto por Rider y Mellon.²¹

Determinación de nitratos más nitritos. El método empleado fue el descrito por Jackson.¹⁰

Resultados y discusión

El tiempo requerido para la percolación de las soluciones conteniendo las distintas fuentes de nitrógeno a través de las columnas de suelo, fue variable. En la muestra de suelo del "Crucero" las soluciones acuosas de los fertilizantes percolaron aproximadamente a las tres horas, ocurriendo lo mismo en la muestra de suelo de "Juchitepec". En el suelo de "Cocotitlán" la percolación fue de 24 horas aproximadamente y en el suelo del "Valle del Yaqui" fue de 48 horas; sin embargo, con objeto de que todas las muestras de suelo estudiadas fueran sometidas a las mismas condiciones, todas las columnas se desmontaron a las 48 horas y las diferentes muestras se analizaron al terminarse este período.

La determinación del pH y textura de los suelos en estudio, así como su contenido de materia orgánica, fue hecho para cada muestra representativa de suelo de 10 cm. En el Cuadro 1 se presentan dichos resultados. El pH de los suelos varía desde 6.5 hasta 8.9, su textura es de migajón arenoso, migajón arcillo-arenoso y arcilla. Respecto al contenido de materia orgánica en general, en todos los suelos es baja, siendo el del "Crucero" el más carente de este compuesto.

En las gráficas 1 a 4 se presenta la distribución del nitrógeno ureico y amoniacal a través de las diferentes secciones de las columnas de los suelos, observándose que en todas las muestras estudiadas, y de una manera general, la mayor proporción de la urea hidrolizada se localiza en la capa de suelo de una profundidad de 0-20 cm; hecho que asimismo se manifiesta por la mayor concentración de nitró-

CUADRO 1

Algunas determinaciones fisico-químicas de los suelos estudiados

SUELO	Profundidad en cm	pH	Materia orgánica en %	Textura
EL CRUCERO.....	0 — 10	6.7	0.62	Migajón arenoso.
	10 — 20	6.7	0.69	Migajón arenoso.
	20 — 30	6.5	0.61	Migajón arenoso.
	30 — 40	7.1	0.013	Migajón arenoso.
	40 — 50	7.2	0.40	Migajón arenoso.
	50 — 60	7.3	0.31	Migajón arenoso.
COCOTITLAN.....	0 — 10	6.9	1.35	Migajón arenoso arcilloso.
	10 — 20	6.8	1.31	Migajón arenoso arcilloso.
	20 — 30	6.9	1.19	Migajón arenoso arcilloso.
	30 — 40	7.1	0.86	Migajón arenoso arcilloso.
	40 — 50	7.1	1.02	Migajón arenoso arcilloso.
	50 — 60	7.0	0.95	Migajón arenoso arcilloso.
JUCHITEPEC.....	0 — 10	6.7	1.72	Migajón arenoso.
	10 — 20	6.9	1.59	Migajón arenoso.
	20 — 30	7.4	1.48	Migajón arenoso.
	30 — 40	7.3	0.63	Migajón arenoso.
	40 — 50	7.5	0.86	Migajón arenoso.
	50 — 60	7.6	0.82	Migajón arenoso.
VALLE DEL YAQUI...	0 — 10	8.1	1.02	Arcilla.
	10 — 20	8.3	0.80	Arcilla arenosa.
	20 — 30	8.4	0.62	Arcilla.
	30 — 40	8.9	0.82	Arcilla.
	40 — 50	8.1	0.82	Migajón arcilloso.
	50 — 60	8.0	0.82	Migajón limoso.

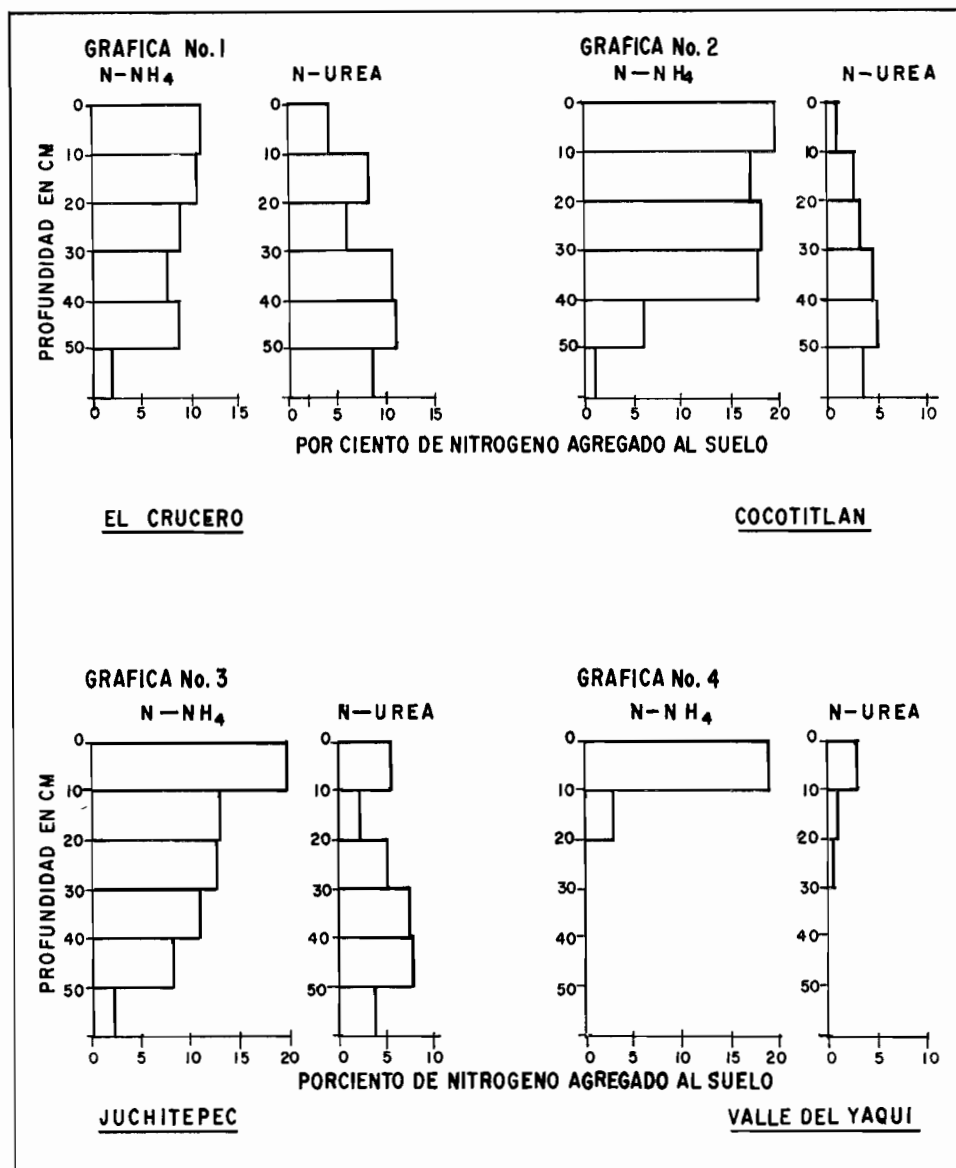
geno amoniacal a dicha profundidad. El porcentaje de nitrógeno amoniacal encontrado a la profundidad de 0-10 cm varía de 11 a 78%, correspondiendo el primero de ellos a la muestra proveniente de "El Crucero" y el segundo, a la muestra del "Valle del Yaqui". Esta alta concentración de nitrógeno amoniacal que se presenta en el suelo del "Valle del Yaqui" puede atribuirse a un elevado pH de 8.1 o bien, y de acuerdo con Summer,^{25, 26} es un valor óptimo para la actividad de la ureasa o por otro lado al movimiento restringido del amoníaco formado a través de la columna del suelo debido a la textura de este suelo.

Respecto al movimiento de la urea no hidrolizada en los suelos estudiados, es muy irregular, encontrándose la mayor acumulación de ella en la capa de 30-50 cm, excepto en el suelo de "Valle del Yaqui", donde es casi totalmente hidrolizada a amoníaco en la capa de 0-20 cm.

Con objeto de comparar el movimiento de la urea a través del suelo con otros fertilizantes nitrogenados, se hicieron percolar bajo las mismas condiciones, soluciones acuosas de sulfato de amonio y nitrato de amonio. En el caso del sulfato de amonio, el radical amonio de este compuesto es casi completamente absorbido en la capa superficial 0-10 cm de todas las muestras estudiadas.

Según puede apreciarse en las gráficas 5 a 8, de todos los suelos el que mayor absorción presenta es el de "Juchitepec" (93.6%). En el suelo del Valle del Yaqui

Movimiento de 150 ppm de nitrógeno de urea en los suelos estudiados



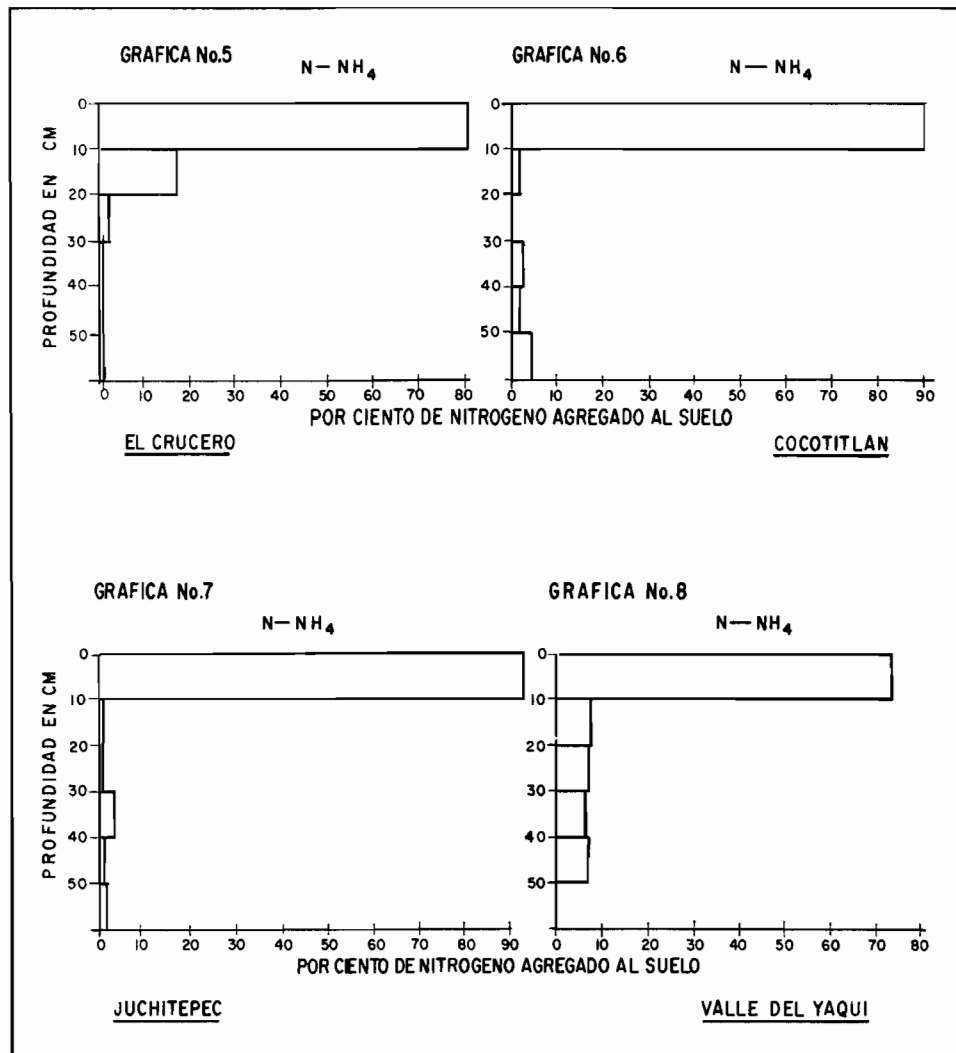
la distribución del amonio en la capa de suelo de 10-40 cm sigue un gradiente de concentración.

Respecto al movimiento del nitrato de amonio, en las gráficas 9 a 12 se observa que la acumulación del amonio sigue el mismo mecanismo que en el caso del sulfato de amonio; es decir, se acumula la mayor parte en la capa de 0-10 cm. En este caso, es el suelo del "Crucero" el que mayor acumulación presenta (93.4%). En lo refe-

rente a los nitratos, éstos se acumulan en su mayor parte en las capas de 30-40 cm en los suelos de "Juchitepec" y "Valle del Yaqui"; en los suelos del "Crucero" y "Cocotitlán", a los 40-50 cm.

De acuerdo con los resultados de la movilidad de los tres fertilizantes nitrogenados, puede decirse que en los suelos estudiados el amonio se localiza en la capa superficial del suelo, los nitratos se mueven rápidamente siendo percolados con facilidad y el nitrógeno ureico ocupa una posición media en cuanto a su facilidad de percolación.

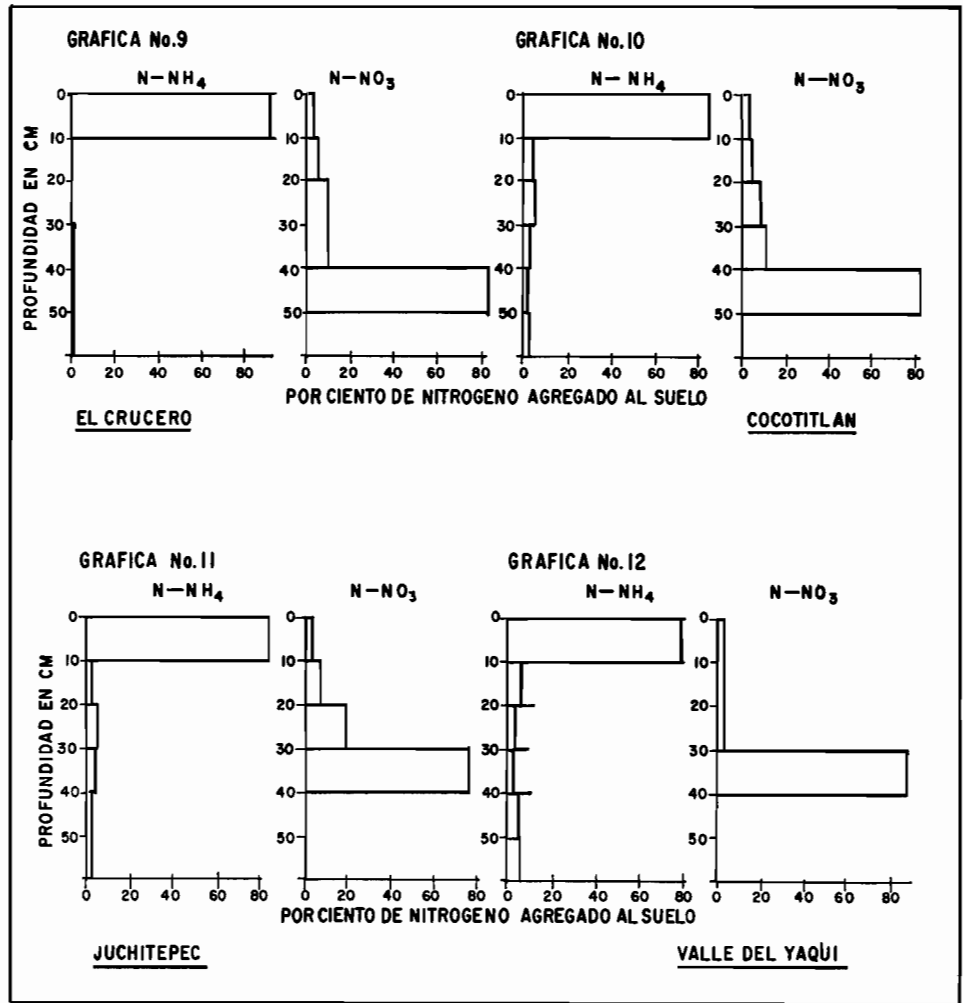
Movimiento de 150 ppm de nitrógeno de sulfato de amonio en los suelos estudiados



Con el propósito de observar si existían diferencias en la velocidad de hidrólisis de la urea por las muestras de suelo en estudio, se llevó a cabo un experimento de hidrólisis de este fertilizante bajo condiciones de laboratorio. Los resultados obtenidos se presentan en el cuadro 2 y de estos datos se desprende que, en general, los suelos tienen un poder hidrolítico aceptable, ya que después de 2 días de incubación a 25° C, la urea residual en la capa de suelo de 0-10 cm oscila entre 3.86 y 4.66 ppm.

Para conocer la capacidad de nitrificación natural de estos suelos, se procedió a determinar su poder nitrificante en ausencia de las fuentes nitrogenadas probadas en este estudio. Los resultados obtenidos se presentan en el Cuadro 3. Por lo que

Movimiento de 150 ppm de nitrógeno de nitrato de amonio en los suelos estudiados



CUADRO 2

*Resultados de la hidrólisis de 150 ppm de nitrógeno de urea
a $25^{\circ} \pm 1^{\circ}\text{C}$ en los suelos*

SUELO	Profundidad en cm	N-de Urea residual en ppm Días de incubación		
		1	2	7
EL CRUCERO.....	0 — 10	5.43	3.86	2.33
	10 — 20	8.54	3.10	1.55
	20 — 30	9.32	2.71	0.51
COCOTITLAN.....	0 — 10	4.66	2.71	2.33
	10 — 20	3.10	3.07	2.33
	20 — 30	3.49	3.01	2.33
JUCHITEPEC.....	0 — 10	2.71	2.71	2.33
	10 — 20	6.19	3.49	2.33
	20 — 30	6.57	3.88	3.49
VALLE DEL YAQUI.....	0 — 10	...	4.66	3.49
	10 — 20	...	3.86	2.67
	20 — 30	...	2.33	0.00

respecta a los resultados de la nitrificación de la urea en los suelos estudiados, los datos se presentan en el Cuadro 4. La mayor nitrificación se presenta en la capa de 0-20 cm de todos los suelos, siendo el suelo de "Cocotitlán" el que forma más nitratos. En todos los suelos el tratamiento con urea provoca la aparición de pequeñas cantidades de nitritos a los 14 días de incubación, mismas que desaparecen posteriormente, excepto en el suelo del "Valle del Yaqui", donde después de 4 semanas de incubación siguen persistiendo.

En lo referente a pérdidas, se encontró que las pérdidas de nitrógeno son muy pequeñas para el "Crucero", "Cocotitlán" y "Juchitepec", ya que presentan pérdidas de 3 a 10 ppm de nitrógeno de urea. En el suelo del "Valle del Yaqui" las pérdidas corresponden a 45-47 ppm de nitrógeno de urea, cantidad que a su vez es equivalente a un 30% del nitrógeno del fertilizante agregado, bajo condiciones de laboratorio. De lo anteriormente observado se puede decir que bajo condiciones de campo no es aconsejable la aplicación superficial de urea en suelos de este tipo.

Los resultados obtenidos en la prueba de nitrificación del sulfato de amonio por los suelos se presenta en el Cuadro 5. La formación de nitratos más abundante se localiza en todos los suelos en la capa de 0-20 cm, siendo el del "Valle del Yaqui" el que mayor cantidad de nitratos presenta (143.5 ppm), mientras que el suelo de "Requena" mostró la menor producción de nitratos (101.8 ppm). En este mismo Cuadro puede notarse la formación de pequeñas cantidades de nitritos en los suelos de "Cocotitlán" y "Valle del Yaqui" a los 14 días de incubación; sin embargo, en el primero de los suelos desaparecen. Por otro lado, en el suelo del "Valle del Yaqui" los nitritos siguen persistiendo en pequeñas cantidades a los 28 días de incubación.

CUADRO 3

Resultados de la nitrificación de los suelos a una temperatura de incubación de $25^{\circ} \pm 1^{\circ}\text{C}$

SUELO	Profundidad en cm	pH	N-NH ₄ en ppm	N-NO ₂ en ppm	N-NO ₃ en ppm
TIEMPO DE INCUBACION: 14 DIAS					
EL CRUCERO.....	0 — 10	6.2	2.28	0	17.69
	10 — 20	6.4	2.83	0	13.27
	20 — 30	6.1	2.23	0	22.12
	30 — 40	6.5	9.06	0	13.27
	40 — 50	6.7	10.05	0	26.54
	50 — 60	7.0	9.18	0	28.75
COCOTITLAN.....	0 — 10	6.5	1.75	0	30.96
	10 — 20	6.5	1.99	0	35.39
	20 — 30	6.5	14.80	0	26.54
	30 — 40	6.8	17.40	0	15.48
	40 — 50	7.1	18.18	0	13.27
	50 — 60	6.9	19.63	0	15.48
JUCHITEPEC.....	0 — 10	6.1	2.35	0	24.33
	10 — 20	6.4	4.04	0	22.12
	20 — 30	6.7	10.08	0	21.01
	30 — 40	6.9	12.74	0	13.27
	40 — 50	7.2	13.59	0	11.06
	50 — 60	7.2	18.42	0	13.27
VALLE DEL YAQUI....	0 — 10	8.1	0	0.15	29.19
	10 — 20	8.3	12.56	0.18	24.33
	20 — 30	8.4	6.98	0.02	88.48
TIEMPO DE INCUBACION: 28 DIAS					
EL CRUCERO.....	0 — 10	6.1	0	0	21.62
	10 — 20	6.2	0	0	16.40
	20 — 30	6.0	0	0	26.81
	30 — 40	6.5	4.13	0	18.48
	40 — 50	6.6	5.08	0	30.36
	50 — 60	6.8	4.28	0	31.57
COCOTITLAN.....	0 — 10	6.4	0	0	33.18
	10 — 20	6.4	0	0	37.24
	20 — 30	6.3	7.64	0	32.97
	30 — 40	6.7	9.46	0	23.16
	40 — 50	7.0	10.32	0	20.94
	50 — 60	6.7	11.51	0	22.75
JUCHITEPEC.....	0 — 10	6.0	0	0	27.91
	10 — 20	6.2	0	0	26.84
	20 — 30	6.5	4.89	0	26.22
	30 — 40	6.6	6.31	0	20.18
	40 — 50	7.1	7.18	0	16.74
	50 — 60	7.1	8.25	0	20.46
VALLE DEL YAQUI....	0 — 10	8.1	0	0.15	29.19
	10 — 20	8.3	12.50	0.18	24.36
	20 — 30	8.4	6.92	0.02	88.50

CUADRO 4

Resultados de la nitrificación de 150 ppm de N- de urea en los suelos a una temperatura de incubación de $25^{\circ} \pm 1^{\circ}\text{C}$

SUELO	Profundidad en cm	pH	N-NH ₄ en ppm	N-NO ₂ en ppm	N-NO ₃ en ppm	N-NO ₃ formado del fertilizante en ppm
TIEMPO DE INCUBACION: 14 DIAS						
EL CRUCERO.....	0 — 10	6.1	104.40	0	58.61	40.92
	10 — 20	6.0	108.80	0	46.45	33.18
	20 — 30	5.9	117.80	0	55.30	33.18
	30 — 40	6.7	121.50	0	35.59	22.12
	40 — 50	7.1	118.70	0	51.14	24.60
	50 — 60	7.2	120.50	0.04	50.87	22.12
COCOTITLAN.....	0 — 10	6.2	81.27	0	95.10	64.14
	10 — 20	6.6	102.85	0	75.20	39.81
	20 — 30	6.9	101.13	0.03	55.29	28.75
	30 — 40	7.1	108.22	0.10	33.17	17.69
	40 — 50	7.3	112.33	0.12	26.54	13.27
	50 — 60	7.3	109.76	0.06	28.75	13.27
JUCHITEPEC.....	0 — 10	6.2	106.52	0	64.33	40.00
	10 — 20	6.7	116.84	0	40.51	28.39
	20 — 30	7.6	128.36	0	30.85	9.84
	30 — 40	7.5	132.18	0	16.65	3.38
	40 — 50	7.7	119.79	0.03	25.38	14.32
	50 — 60	7.75	122.23	0.01	19.67	6.40
VALLE DEL YAQUI....	0 — 10	8.0	20.84	0.21	112.84	83.65
	10 — 20	8.2	23.52	0.23	103.52	79.19
	20 — 30	8.3	32.28	1.62	156.66	68.16
TIEMPO DE INCUBACION: 28 DIAS						
EL CRUCERO.....	0 — 10	5.9	38.60	0	130.24	108.62
	10 — 20	5.9	52.58	0	108.83	92.43
	20 — 30	5.6	51.40	0	120.62	93.81
	30 — 40	6.2	82.24	0	87.74	65.26
	40 — 50	7.0	76.85	0	102.67	72.31
	50 — 60	7.0	81.37	0	96.41	64.84
COCOTITLAN.....	0 — 10	6.0	18.15	0	162.36	129.18
	10 — 20	6.4	42.80	0	141.08	103.84
	20 — 30	6.6	58.94	0	119.69	86.72
	30 — 40	6.9	95.62	0	77.22	54.06
	40 — 50	7.0	99.73	0	61.57	40.63
	50 — 60	7.1	98.61	0	63.17	40.42
JUCHITEPEC.....	0 — 10	6.0	42.81	0	134.09	106.18
	10 — 20	6.4	58.44	0	117.58	90.74
	20 — 30	7.4	118.50	0	55.85	29.63
	30 — 40	7.4	137.62	0	30.74	10.56
	40 — 50	7.5	105.13	0	60.59	43.85
	50 — 60	7.5	127.28	0	40.68	20.22
VALLE DEL YAQUI....	0 — 10	7.8	3.20	0.17	130.42	101.23
	10 — 20	8.0	5.65	0.19	121.42	97.06
	20 — 30	8.2	17.58	1.46	181.36	92.86

CUADRO 5

Resultados de la nitrificación de 150 ppm de N- de $(\text{NH}_4)_2 \text{SO}_4$ en los suelos a una temperatura de incubación de $25^\circ \pm 1^\circ \text{C}$

SUELO	Profundidad en cm	pH	N-NH ₄ en ppm	N-NO ₂ en ppm	N-NO ₃ en ppm	N-NO ₃ formado del fertilizante en ppm
TIEMPO DE INCUBACION: 14 DIAS						
EL CRUCERO.....	0 --- 10	6.2	118.61	0	48.65	30.96
	10 --- 20	6.0	126.86	0	35.39	22.12
	20 --- 30	6.0	124.54	0	46.45	24.33
	30 --- 40	6.5	132.72	0	28.75	15.48
	40 --- 50	6.7	138.64	0	35.38	8.84
	50 --- 60	6.7	130.17	0	44.23	15.48
COCOTITLAN.....	0 --- 10	6.2	96.13	0	81.83	50.87
	10 --- 20	6.5	116.04	0	66.35	30.96
	20 --- 30	6.7	128.31	0.01	44.23	17.69
	30 --- 40	6.9	133.73	0.02	28.75	13.27
	40 --- 50	7.1	136.94	0.01	24.33	11.06
	50 --- 60	7.0	130.31	0.025	33.17	17.69
JUCHITEPEC.....	0 --- 10	6.2	110.40	0	61.93	37.60
	10 --- 20	6.4	125.84	0	44.28	22.16
	20 --- 30	7.0	133.16	0	36.85	15.84
	30 --- 40	7.1	137.92	0	24.35	11.08
	40 --- 50	7.2	139.16	0	19.90	8.84
	50 --- 60	7.0	140.63	0	24.35	11.08
VALLE DEL YAQUI....	0 --- 10	8.0	50.52	0.15	123.67	94.48
	10 --- 20	8.1	60.38	0.20	107.95	83.62
	20 --- 30	8.3	67.66	0.28	165.82	77.34
TIEMPO DE INCUBACION: 28 DIAS						
EL CRUCERO.....	0 --- 10	6.0	46.82	0	123.80	102.18
	10 --- 20	5.8	59.36	0	106.04	89.64
	20 --- 30	5.7	56.24	0	118.57	91.76
	30 --- 40	6.4	88.11	0	79.37	60.89
	40 --- 50	6.6	112.08	0	66.28	35.92
	50 --- 60	6.6	84.04	0	96.53	64.96
COCOTITLAN.....	0 --- 10	5.9	46.08	0	136.10	102.92
	10 --- 20	6.3	57.14	0	131.10	93.86
	20 --- 30	6.5	96.37	0	85.60	52.63
	30 --- 40	6.7	101.52	0	73.64	50.48
	40 --- 50	7.0	107.25	0	64.69	43.75
	50 --- 60	6.9	97.71	0	76.04	53.29
JUCHITEPEC.....	0 --- 10	6.0	47.14	0	129.77	101.86
	10 --- 20	6.2	64.48	0	111.36	84.52
	20 --- 30	6.8	101.69	0	72.53	46.31
	30 --- 40	6.9	103.10	0	64.08	43.90
	40 --- 50	6.8	122.13	0	44.61	27.87
	50 --- 60	6.8	104.75	0	64.71	44.25
VALLE DEL YAQUI....	0 --- 10	7.6	1.57	0.15	172.69	143.50
	10 --- 20	7.8	6.72	0.18	162.24	137.88
	20 --- 30	8.1	24.18	0.20	207.14	118.64

CUADRO 6

Resultados de la nitrificación de 150 ppm de $N-NH_4 NO_3$ en los suelos a una temperatura de incubación de $25^\circ \pm 1^\circ C$

SUELO	Profundidad en cm	pH	N-NH ₄ en ppm	N-NO ₂ en ppm	N-NO ₃ en ppm	N-NO ₃ formado del fertilizante en ppm
TIEMPO DE INCUBACION: 14 DIAS						
EL CRUCERO.....	0 -- 10	5.9	48.67	0	117.02	24.33
	10 -- 20	5.9	49.43	0	112.60	24.33
	20 -- 30	6.3	55.54	0	115.58	18.46
	30 -- 40	6.7	56.25	0	105.02	16.75
	40 -- 50	6.8	54.36	0	119.18	17.64
	50 -- 60	7.0	53.68	0	122.07	18.32
COCOTITLAN.....	0 -- 10	6.3	26.58	0	152.38	46.42
	10 -- 20	6.7	42.44	0	140.95	30.56
	20 -- 30	6.9	53.24	0	124.27	22.73
	30 -- 40	7.0	51.24	0.004	113.21	22.73
	40 -- 50	7.2	50.16	0.007	109.11	20.84
	50 -- 60	7.0	55.53	0.007	109.95	19.47
JUCHITEPEC.....	0 -- 10	6.1	32.16	0	140.17	40.84
	10 -- 20	6.7	44.48	0	126.64	29.52
	20 -- 30	7.1	58.04	0	115.97	19.96
	30 -- 40	7.2	59.08	0	106.19	17.92
	40 -- 50	7.1	61.13	0.014	101.93	15.87
	50 -- 60	7.1	57.35	0.01	107.92	19.65
VALLE DEL YAQUI...	0 -- 10	7.9	21.13	0.20	156.06	51.87
	10 -- 20	8.1	27.46	0.22	160.99	46.54
	20 -- 30	8.1	33.55	0.05	202.93	39.45
TIEMPO DE INCUBACION: 28 DIAS						
EL CRUCERO.....	0 -- 10	5.8	19.08	0	150.54	53.92
	10 -- 20	5.8	18.82	0	145.58	53.18
	20 -- 30	6.2	24.66	0	149.15	47.34
	30 -- 40	6.5	25.32	0	140.16	46.68
	40 -- 50	6.6	26.48	0	153.88	48.52
	50 -- 60	6.9	25.29	0	157.28	50.71
COCOTITLAN.....	0 -- 10	6.1	5.36	0	176.82	68.64
	10 -- 20	6.6	13.28	0	172.96	60.72
	20 -- 30	6.8	24.52	0	159.45	51.48
	30 -- 40	6.9	24.87	0	150.29	52.19
	40 -- 50	7.1	27.73	0	145.21	49.27
	50 -- 60	6.9	30.44	0	145.31	47.56
JUCHITEPEC.....	0 -- 10	6.0	13.76	0	165.15	62.24
	10 -- 20	6.6	17.62	0	158.22	56.38
	20 -- 30	7.0	31.26	0	146.96	45.74
	30 -- 40	7.1	34.08	0	139.10	43.92
	40 -- 50	7.0	38.02	0	131.72	39.98
	50 -- 60	7.0	37.15	0	136.31	40.85
VALLE DEL YAQUI...	0 -- 10	7.8	5.52	0.18	176.12	71.93
	10 -- 20	8.0	8.25	0.20	164.11	64.75
	20 -- 30	8.0	17.52	0.04	221.98	58.48

La presencia de nitritos en estos suelos puede ser debida, cuando menos en el suelo del "Valle del Yaqui", a las condiciones de alcalinidad con su efecto subsecuente sobre la flora nitrificante. Es también posible que otro factor responsable de esta presencia de nitritos sea la textura pesada de este suelo, que bajo condiciones de humedad óptima crea condiciones de anaerobiosis con baja tensión de oxígeno, las cuales impiden la oxidación de nitritos a nitratos.

Las pérdidas de amoníaco por volatilización cuando se emplea sulfato de amonio como fuente de nitrógeno para estos suelos, son muy pequeñas aún para el suelo del "Valle del Yaqui", el cual presenta pérdidas de 5 a 8 ppm de nitrógeno del sulfato de amonio, equivalentes aproximadamente a un 3.3 o 5.3% del fertilizante total añadido.

Finalmente, en el Cuadro 6 se presentan los resultados obtenidos en el proceso de la nitrificación del nitrato de amonio agregado en los suelos estudiados. La formación de nitratos sigue el mismo patrón descrito para otras fuentes de nitrógeno, esto es, la cantidad de nitratos formada es mayor en la capa de 0-20 cm de todos los suelos.

Las pérdidas por volatilización del amoníaco del nitrato de amonio aplicado en todos estos suelos, fueron insignificantes, hecho que concuerda con los estudios de Van Schreven.

Conclusiones

1. Los suelos del Estado de México, por su pH, corresponden a suelos ligeramente ácidos y en el estado de Sonora, a un suelo alcalino. En cuanto a su textura, dos suelos del Edo. de México son migajones arenosos y uno corresponde a un migajón arcillo-arenoso. El suelo del Estado de Sonora corresponde a una arcilla. Por lo que respecta al contenido de materia orgánica, dos de ellos acusan una cantidad media (Cocotitlán y Juchitepec) y dos un contenido bajo (Crucero y Valle del Yaqui).

2. Los resultados obtenidos de la percolación de tres fertilizantes nitrogenados (urea, sulfato de amonio y nitrato de amonio) en solución acuosa y de la concentración de 150 ppm de nitrógeno a través de columnas de suelos provenientes de los estados de México y Sonora, indican lo siguiente:

El amoníaco es absorbido en la superficie del suelo por el complejo de intercambio, siendo por este motivo de percolación lenta; los nitratos, por considerarse iones móviles,⁵ son fácilmente percolados, y por último la urea muestra una velocidad de percolación intermedia.

3. La velocidad de hidrólisis de la urea por los suelos en estudio bajo condiciones de laboratorio, puede considerarse apropiada y bastante semejante en todos ellos.

4. El poder nitrificante natural de los suelos estudiados es bajo. La producción de nitratos a los 14 y 28 días de incubación es reducida. El poder nitrificante del suelo de Sonora después de 14 días de incubación, es menor que en los anteriores y además presenta acumulación de pequeñas cantidades de nitritos.

5. Los datos de nitrificación de fuentes nitrogenadas obtenidos en el laboratorio, indican que para la fertilización de los suelos del Estado de México se pueden utilizar: urea, sulfato o nitrato de amonio, pero tomando en cuenta la textura de esos suelos deben preferirse la urea o el sulfato, al nitrato de amonio. En el suelo del

estado de Sonora pueden utilizarse el sulfato y nitrato de amonio, y en el caso de utilizarse urea, ésta debe ser aplicada a una profundidad no menor de 20 cm para evitar una posible pérdida del amoniaco formado por volatilización.

6. El suelo de "Cocotitlán" fue el que presentó la máxima velocidad de nitrificación para la urea agregada, formándose 4.5 ppm de nitratos por día. En el suelo del "Valle del Yaqui" las máximas velocidades de nitrificación para el sulfato y nitrato de amonio fueron de 5.12 y 2.5 ppm de nitratos, respectivamente.

Referencias citadas

1. ASSOCIATION OF OFFICIAL AGRICULTURAL CHEMISTS. (1955.) Eighth Ed. Assoc. of Official Agric. pp. 12-13. Washington, D. C., U. S. A.
2. BENSON, N., y R. M. BARNETTE. (1939.) *Leaching studies with various sources of nitrogen.* Jour. Amer. Soc. Agronomy. 31:44-54.
3. BROADBENT, F. E., K. B. TYLER y G. N. HILL. (1958.) *Transformations and movement of urea in soils.* Soil. Sci. Soc. Amer. Proc. 22:303-307.
4. BURGESS, A. (1958.) *Microorganism in the soil.* Hutchinson University Library. pp. 141-193. London, England.
5. CONRAD, J. P., y C. N. ADAMS. (1940.) *Retention by soils of the nitrogen of urea and some related phenomena.* Jour. Amer. Soc. Agr. 32:48-54.
6. ERNEST, J. W., y H. F. MASSEY. (1960.) *The effects of several factors on volatilization of ammonia formed from urea in the soil.* Soil. Sci. Soc. Amer. Proc. 24:87-90.
7. FISHER, W. B., y W. L. PARKS. (1958.) *Influence of soil temperature on urea hydrolysis and subsequent nitrification.* Soil Sci. Soc. Amer. Proc. 22:247-248.
8. FREDERIK, L. R. (1956.) *The formation of nitrate from ammonium nitrogen in soils. I. Effect of temperature.* Soil. Sci. Soc. Amer. Proc. 20:496-500.
9. GONZÁLEZ, G. A. (1941.) *Introducción al estudio de los suelos.* Banco Nacional de Crédito Agrícola, S. A. 27-30. México, D. F.
10. JACKSON, M. L. (1958.) *Chemical Analysis.* Prentice Hall Inc. p. 193. Englewood Cliffs. N. J., U. S. A.
11. JENSEN, H. L. (1950.) *Effect of organic compounds on Nitrosomonas.* Nature 165:974.
12. JEWITT, T. N. (1942.) *Loss of ammonia from ammonium sulfate applied to alkaline soils.* Soil Sci. 54:401-409.
13. LEES, H. (1948.) *The effects of zinc and copper on soil nitrification.* Biochem. Jour 42:534-535.
14. LEES, H. (1954.) *The biochemistry of nitrifying bacteria. Autotrophic microorganisms.* Cambridge University Press, p. 84-98. Cambridge, England.
15. MARTIN, J. P., y H. D. CHAPMAN. (1951.) *Volatilization of ammonia from surface fertilized soils.* Soil Sci. 71:25-34.
16. MEIKELJON, J. (1953.) *The nitrifying bacteria; A review.* Jour. of Soil. Sci. 4:59-68.
17. MEIKELJON, J. (1954.) *Some aspects of the physiology of the nitrifying bacteria autotrophic microorganisms.* Cambridge University Press, p. 68-83. Cambridge, England.
18. ORTEGA, E. T. (1959-60.) *Diagnóstico de las deficiencias de nitrógeno en el algodónero.* Agricultura Técnica de México, Núm. 9, p. 34-35.
19. PAISLEY, K. (1960.) *Fertilizers and manures.* W. H. & L. Collingridge Ltd. P. 95-96. London, England.
20. PIPER, C. S. (1947.) *Soil and plant analysis.* Interscience Publishers, Inc. p. 208-210. New York, U. S. A.
21. RIDER, B. F., y M. G. MELLON. (1946.) *Colorimetric determination of nitrites.* Ind. Eng. Chem. Anal. Ed. 18:96-99.
22. SABEY, B. R., BARTHOLONIEW, W. R., SHAW, R., y PESEK, J. (1956.) *Influence of temperature on nitrification in soils.* Soil. Sci. Soc. Amer. Proc. 20:357-360.
23. SÁNCHEZ, A. M., CARRETO, V., y R. GARCÍA. (1947.) *Amonificación, nitrificación y fijación de nitrógeno en los suelos de Texcoco.* Revista de la Sociedad Mexicana de Historia Natural. Tomo VIII: 29-45.
24. SCHREVEN, D. A. VAN. (1950.) *Translations 4th International Congress of Soil Science.* 1:259-262. Amsterdam, Holanda.

25. SUMMER, J. B. (1926.) *The isolation and cristallization of the enzime urease.* Jour. Biol. Chem. 69:435-441.
26. SUMMER, J. B., y D. B. HAND. (1928.) *The cristaline urease. II.* Jour. Biol. Chem. 76:149-162.
27. TISDALE, S. L., y W. L. NELSON. (1956.) *Soil fertility and fertilizers.* The McMillan, Co. p. 135. New York, U. S. A.
28. VOLK, G. M. (1950.) *Factors determining efficiency of Cynamid and Uramon for weed control in tobacco plant beds.* Soil Sci. 69:377-390.
29. VOLK, G. M. (1955.) *Urea nitrogen and sandy soils.* Reprinted from Agricultural Chemicals.
30. VOLK, G. M. y A. W. SWEAT. (1955.) *Mobility of urea applied to Florida soils.* Soil Sci. Soc. of Fla. Proc. XV:117-123.
31. WAHHAB, A., RANDHAWA, M. S., y S. Q. ALAM. (1957.) *Loss ammonia from ammonium sulfate under different conditions when applied to soils.* Soil Sci. 84:249-255.
32. WAKSMAN, S. A. *Principles of soil microbiology.* The Williams & Wilkins Co. p. 161-163. Baltimore, Md. U. S. A.
33. WAKSMAN, S. A., y R. L. STARKEY. (1931.) *The soil and the microbe.* John Wiley & Sons. p. 136-153. New York, U. S. A.
34. WAKSMAN, S.A. (1952.) *Soil Microbiology.* John Wiley & Sons. p. 72-73. New York, U. S. A.
35. WALKLEY, A. A. (1947.) *A critical examination of a rapid method for determining organic carbon in soils. Effect of variations in digestion conditions and of inorganic soil constituents.* Soil Sci. 63:251-264.
36. WATT, G. W., y J. D. CHRISP. (1954.) *Spectrophotometric method for determination of urea.* Anal. Chem. 26:452-453.
37. WILCOX, L. V. (1951.) *A method for calculating the saturation percentage from the weight of a known volume of a saturated soil paste.* Soil Sci. 72:233-237.
38. WILSON, H. A., y G. STEWART. (1955.) *Ammonification and nitrification in a strip mine spoik.* West Virginia University Agricultural Experiment Station. Bull Núm. 379 T. p. 1-16.