



## XXV CONGRESO ARGENTINO DE LA CIENCIA DEL SUELO

“Ordenamiento Territorial: un desafío para la Ciencia del Suelo”

Río Cuarto, 27 de Junio - 01 de Julio de 2016

### RELACIONES ENTRE INDICADORES DE MINERALIZACIÓN DE NITRÓGENO Y FRACCIONES ORGÁNICAS EN SUELOS DEL SUDOESTE BONAERENSE

JUAN MANUEL MARTÍNEZ<sup>1,3,\*</sup>, JUAN GALANTINI<sup>2</sup>, MATÍAS E. DUVAL<sup>1</sup>, FERNANDO M. LÓPEZ<sup>1,3</sup>, JULIO O. IGLESIAS<sup>3</sup> & DAIANA S. HUESPE<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Conicet- Cerzos; <sup>2</sup>Comisión de Investigaciones Científicas (CIC)-CERZOS; <sup>3</sup>Dpto. de Agronomía-Universidad Nacional del Sur. \*San Andrés 800-Bahía Blanca, Buenos Aires, 0291-4595102.

\*jmmartinez@criba.edu.ar.

**Palabras Clave:** regiones semiárida y subhúmeda- Siembra directa- Nitrógeno potencialmente mineralizable.

#### Resumen

En la actualidad, no existen estudios que establezcan relaciones de los indicadores de mineralización de nitrógeno (N)-como el N determinado en anaerobiosis (Nan) y el N hidrolizable (Nhid)- con las fracciones orgánicas en suelos con aportes variables de materia orgánica particulada (MOP). El objetivo de este estudio fue evaluar al Nan y Nhid, y la relación con las fracciones orgánicas de carbono (C) y N del suelo, lábiles y recalitrantes en suelos del sudoeste bonaerense (SOB). Durante 2010 y 2011, se muestrearon 78 lotes bajo siembra directa (SD) en 0-20 cm, destinados al cultivo de trigo (*Triticum aestivum* L.) y de cebada cervecera (*Hordeum vulgare* L.) dentro de lo que comprende la región semiárida y subhúmeda. Se cuantificó Nhid y Nan, y se evaluó: carbono orgánico total (COT), particulado (COP) y asociado a la fracción mineral (COM); N orgánico total (Nt), particulado (NOP), y asociado a la fracción mineral (NOM), carbohidratos totales (CHt) y solubles (CHs). Los suelos se clasificaron en 2 grupos por el análisis de clúster de acuerdo a las fracciones orgánicas y al contenido de limo+arcilla: A y B. Los valores de Nhid y Nan fueron de 6,5-50,4 mg kg<sup>-1</sup> y 10,7-81,9 mg kg<sup>-1</sup>, respectivamente. Se hallaron asociaciones significativas entre Nan y Nhid con las fracciones orgánicas evaluadas que difirieron según el grupo de suelo considerado. Las relaciones entre Nan y Nhid con los diferentes pools de C y N, lábiles o recalitrantes, son dependientes de la protección física producida por el limo+arcilla. El análisis de clúster permitió lograr este agrupamiento en base a varias fracciones orgánicas y debería ser usado para comparar suelos con condiciones similares.

#### Introducción

El nitrógeno(N) es el nutriente más limitante para la producción de cultivos en las zonas agrícolas (Fageria & Baligar, 2005). En las regiones, semiáridas y subhúmedas es necesario hacer un diagnóstico correcto de la fertilización ya que los rendimientos son



## XXV CONGRESO ARGENTINO DE LA CIENCIA DEL SUELO

“Ordenamiento Territorial: un desafío para la Ciencia del Suelo”

Río Cuarto, 27 de Junio - 01 de Julio de 2016

---

más limitados. Para mejorar el diagnóstico nitrogenado, el conocimiento del N que se mineralizará de la materia orgánica (MO) podría ser fundamental para ajustar la dosis de N a aplicar (St. Luce *et al.*, 2011).

La mayoría de las estimaciones de la contribución de N por mineralización del suelo se basan en las incubaciones aeróbicas durante largos períodos (Stanford & Smith, 1972). Esta metodología permite determinar la fracción del N del suelo que es susceptible de ser transformada a formas minerales, también denominada N potencialmente mineralizable (Npm). El Npm es la fracción del N orgánico considerada como una estimación estandarizada de la mineralización potencial del suelo. Sin embargo, esta metodología demanda tiempo de procesamiento (Walley *et al.*, 2002) por lo que la investigación se centró en el desarrollo de diferentes métodos biológicos y químicos, rápidos y sencillos para la determinación del Npm (Echeverría *et al.*, 1994; Griffin *et al.*, 2008).

Las fracciones lábiles de la MO tienen una importante participación en la dinámica del N (Cozzoli *et al.*, 2010). Estas están muy ligadas a la productividad por que influyen en la disponibilidad de nutrientes (Wander, 2004), especialmente sobre el N. La MO particulada (MOP) está principalmente compuesta de los residuos vegetales provenientes de los cultivos parcialmente descompuestos, que pueden proporcionar un 25 a 60% del N mineralizado (Ford & Greenland, 1968). Otra fracción lábil de carbono (C) de gran importancia, la constituyen los hidratos de carbono (CH), que son utilizados como sustrato energético por los microorganismos del suelo (Cheshire, 1979).

En la región semiárida y subhúmeda del SOB, con suelos de texturas gruesas y bajos niveles de MO, no existe información sobre la mineralización del N proveniente de la descomposición de los residuos de los cultivos y de la MO del suelo. Además, en la actualidad no existen estudios que establezcan las relaciones entre los indicadores rápidos de mineralización- como  $N_{an}$  y el  $N_{hid}$ - con las fracciones orgánicas del suelo en regiones semiáridas y subhúmedas. El objetivo de este estudio fue evaluar al  $N_{an}$  y  $N_{hid}$ , y la relación con las fracciones orgánicas de C y N del suelo, lábiles y recalcitrantes en varios suelos representativos del SOB.

### **Materiales y Métodos**

Durante los años 2010 y 2011 se muestrearon 78 lotes de productores destinados al cultivo de trigo (*Triticum aestivum* L.) y de cebada cervecera (*Hordeum vulgare* L.) bajo SD, situados en 13 sitios en el SOB, dentro de lo que comprende la región semiárida y subhúmeda.

En cada uno de los lotes se seleccionaron tres áreas de muestreo georeferenciadas, homogéneas y uniformes de aproximadamente 50 m<sup>2</sup>, siendo estas representativas de



## XXV CONGRESO ARGENTINO DE LA CIENCIA DEL SUELO

“Ordenamiento Territorial: un desafío para la Ciencia del Suelo”

Río Cuarto, 27 de Junio - 01 de Julio de 2016

---

los lotes para reducir la variabilidad espacial. El muestreo se llevó a cabo en esas áreas de muestreo en las profundidades de 0-20 cm, durante el invierno antes de la siembra del cultivo de trigo o cebada. Se secaron las muestras al aire y se tamizaron por una malla de 2 mm. Se analizaron en los siguientes parámetros edáficos para clasificar a los sitios: carbono orgánico total (COT) por combustión seca con analizador automático Leco (Leco Corporation, St Joseph, MI), fósforo extraíble (Pe, Bray&Kurtz, 1945), N total de los suelos (Nt) por el método Kjeldahl (Bremner & Mulvaney, 1982) y pH en suspensión suelo-agua 1:2,5 por el método potenciométrico. Como parámetros físicos se estimó la granulometría por tamaño de partículas por fraccionamiento físico de la MO (Duval *et al.*, 2013), descontándole el porcentaje de MO de cada fracción (mayor y menor de 53 micrones), se obtuvieron las fracciones arena y la compuesta de limo+arcilla.

Los indicadores de la mineralización analizados fueron el N mineralizado en anaerobiosis (Waring & Bremner, 1964) y el N hidrolizable (Gianello & Bremner 1986). Se realizó el fraccionamiento físico por tamaño de partícula (Duval *et al.*, 2013) separando dos fracciones por tamaño: 53-2000 micrones denominado fracción gruesa (FG) y menor a 53 micrones, denominado fracción fina (FF). En la FG se determinó C y N, obteniendo al C y N orgánico particulado (COP y NOP). En la FF se determinó C y N, obteniendo C y N orgánico asociado a la fracción mineral (COM y NOM). Además se determinaron hidratos de C totales (CHt) y solubles (CHs) siguiendo el procedimiento propuesto por Puget *et al.*, (1999).

### **Análisis estadístico**

Se realizó el análisis de cluster teniendo en cuenta la distancia de Ward según las medias de las fracciones orgánicas (COT, Nt, COP; NOP) y el contenido de limo+arcilla que se encuentra altamente ligado a las fracciones orgánicas (Galantini *et al.*, 2004). El corte del grado de agrupamiento de los sitios se realizó en el 50% de la distancia total (Balzarini *et al.*, 2008).

Se realizó la estadística descriptiva de los indicadores de mineralización estudiados para todos los sitios y según grupo de suelos. Se realizó un *test* “t” de medias para comparar los valores de Nan y Nhid para ambos grupos de suelos. Se realizaron regresiones lineales simples para comprobar la relación entre los indicadores de la mineralización. Se realizaron correlaciones de Pearson entre el Nan y Nhid con las fracciones orgánicas estudiadas según grupo de suelo separado por análisis de clúster. Todos los análisis estadísticos se realizaron con el software Infostat (Di Rienzo *et al.*, 2013).

## XXV CONGRESO ARGENTINO DE LA CIENCIA DEL SUELO

“Ordenamiento Territorial: un desafío para la Ciencia del Suelo”

Río Cuarto, 27 de Junio - 01 de Julio de 2016

### Resultados y Discusión

#### Propiedades de los suelos

En general, para todos los sitios el contenido de MO del suelo varió entre 16 y 45 g kg<sup>-1</sup> con un valor medio de 30 g kg<sup>-1</sup>. Las diferencias halladas entre los valores de MO demuestran la variabilidad edáfica de los sitios evaluados. El pH de los suelos presentó valores neutros a levemente ácidos con una media de 6,4, con un rango que osciló entre 6,0 y 7,2. Granulométricamente, los suelos poseen niveles de arenas que oscilaron entre 365 y 690 g kg<sup>-1</sup> con un valor medio de 490 g kg<sup>-1</sup>.

El análisis de clúster mediante las propiedades evaluadas permitió identificar dos grupos de suelos (grupo A y B) (Figura 1). Los sitios del Grupo A presentaron valores más elevados de todas las fracciones orgánicas analizadas. Debido a esta agrupación habría que evaluar los resultados según los grupos obtenidos teniendo en cuenta estas propiedades.

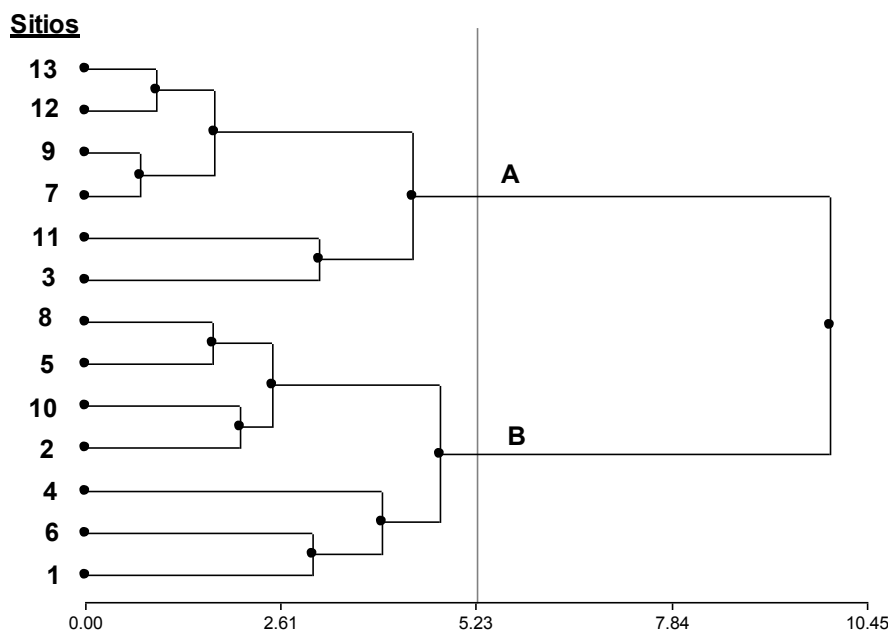


Figura 1. Dendrograma de similaridad de los sitios según las fracciones orgánicas evaluadas mediante distancia de Ward.

#### Nitrógeno anaeróbico e hidrolizable

Los valores promedios de Npm hallados para todos los sitios, se encontraron en los rangos entre 6,5- 50,4mg kg<sup>-1</sup> y 10,7- 81,9 mg kg<sup>-1</sup> para Nhid y Nan, respectivamente (Tabla 1). Los valores de Nanse encuentran en los rangos hallados por otros autores para Argiudoles y Paleudoles Típicos (Cozzoli *et al.*, 2010; Reussi Calvo *et al.*, 2013). Por su parte, Reussi Calvo *et al.* (2011) reportaron valores de Nan entre 25-115 mg kg<sup>-1</sup> para la provincia de Buenos Aires, con menores valores hacia el Oeste. Los valores de

## XXV CONGRESO ARGENTINO DE LA CIENCIA DEL SUELO

“Ordenamiento Territorial: un desafío para la Ciencia del Suelo”

Río Cuarto, 27 de Junio - 01 de Julio de 2016

Nhid fueron semejantes a los hallados por Wang *et al.* (2001) para 19 suelos de Australia con variabilidad en las propiedades químicas.

Al analizar los sitios del grupo A y B, se hallaron diferencias significativas ( $p < 0,05$ ) en Nan con mayores valores en el primer grupo, mientras que con Nhid no ocurrió lo mismo ( $p > 0,05$ ). Esto demuestra que el Nan es más sensible ante las diferencias en las condiciones edáficas -más precisamente a la variación de las fracciones orgánicas- en coincidencia a lo reportado por Echeverría *et al.* (2000), quienes trabajaron en suelos del Sudeste bonaerense en 0-20 cm.

Tabla 1. Resultados de los indicadores de la mineralización de N (estadística descriptiva) por cada sitio y de acuerdo a la agrupación de sitios del análisis de clúster.

Indicador/ grupo suelo		<i>n</i>	Media mg kg <sup>-1</sup>	DS	mínimo	máximo	CV %
Nhid <sup>ns</sup>	A	36	25,1	7,9	11,9	45,5	31
	B	42	21,5	8,9	6,5	50,4	41
Nan <sup>**</sup>	A	36	47,0	20,5	16,5	81,9	44
	B	42	33,4	14,4	10,7	73,7	43

*n*= número de lotes agrícolas por establecimiento, DS, desvío estándar; CV, coeficiente de variación.

Al analizar la relación entre ambos indicadores comparando los sitios según su agrupación por el análisis de clúster (datos no mostrados), para los suelos del grupo A se hallaron relaciones significativas entre Nan y Nhid, ( $p = 0,01$ ) con un coeficiente de explicación de bajo ajuste ( $R^2 = 0,18$ ), mientras que para los del grupo B no se hallaron relaciones significativas ( $p = 0,35$ ). Esto refleja que ambos indicadores provienen de fracciones orgánicas de diferente origen según las características de los suelos en coincidencia a lo informado por St. Luce *et al.* (2011).

### Relaciones de los indicadores rápidos con las fracciones orgánicas

Para los suelos del grupo A, se hallaron relaciones significativas del Nan con COT, COM, Nt; NOM, CHt y CHs (Tabla 2). Mientras que el Nhid presentó asociaciones significativas con COT, COM, NOM, CHt y CHs. Para los suelos del grupo B, se hallaron relaciones significativas del Nan con COP, Nt, NOP, NOM, CHt y CHs. En cambio, para Nhid no se halló ninguna correlación significativa con las fracciones orgánicas evaluadas.

Los indicadores de la mineralización (Nan y Nhid) estuvieron más relacionados con las fracciones orgánicas más recalitrantes, solamente en los suelos del grupo A. Además en ambos indicadores, se hallaron correlaciones con los carbohidratos, que son fracciones lábiles según la bibliografía (Puget *et al.*, 1999; Duval *et al.*, 2013). Esto es debido a que los CH son componentes que actúan como principales fuentes de energía para los microorganismos del suelo (González-Chávez *et al.*, 2010). Por su parte,

## XXV CONGRESO ARGENTINO DE LA CIENCIA DEL SUELO

“Ordenamiento Territorial: un desafío para la Ciencia del Suelo”

Río Cuarto, 27 de Junio - 01 de Julio de 2016

Angers *et al.* (1993) sugirieron que existe un enriquecimiento de CH en la MO bajo el sistema SD, por lo que estas determinaciones cobran relevancia cuando se quiere analizar la mineralización de N bajo este sistema de labranza. Indistintamente del grupo de suelo, se halló que el Nan se correlacionó significativamente con los carbohidratos. Esto es debido a que este N incubado en anaerobiosis consiste del  $\text{NH}_4$  soluble junto al  $\text{NH}_4$  mineralizado (St. Luce *et al.*, 2011), y el proceso de amonificación es llevada a cabo exclusivamente por microorganismos heterótrofos que utilizan al C de los polisacáridos como sustrato energético (Benbi & Richter, 2002).

Caso contrario, sucedió con los suelos del grupo B, donde se hallaron correlaciones significativas del Nan con las fracciones lábiles del C y del N (COP y NOP), CHt y CHs. Estos resultados evidencian un posible efecto de protección física de la MO por parte de las arcillas sobre estas fracciones orgánicas (Balesdent *et al.*, 2000) en los suelos del grupo A. Estas relaciones halladas indican que tanto Nhid como Nan son variables de acuerdo a las características edáficas de los sitios (Griffin, 2008), por lo que sería necesario el agrupamiento de suelos con condiciones similares para hacer evaluaciones de estos indicadores.

Tabla 2. Correlaciones de Pearson entre Nan y Nhid con las fracciones orgánicas evaluadas según grupo de suelo.

Indicador de mineralización	Grupo de cluster	COT	COP	COM	Nt	NOP	NOM	CHt	CHs	
		Coeficiente de correlación (r)								
Nan	A	<b>0,49</b>	-0,09	<b>0,59</b>	<b>0,61</b>	0,04	<b>0,67</b>	<b>0,58</b>	<b>0,59</b>	
	B	0,30	<b>0,43</b>	0,27	<b>0,59</b>	<b>0,36</b>	<b>0,53</b>	<b>0,33</b>	<b>0,63</b>	
Nhid	A	<b>0,38</b>	-0,06	<b>0,45</b>	0,31	-0,01	<b>0,35</b>	<b>0,41</b>	<b>0,46</b>	
	B	-0,25	0,01	-	0,24	0,10	0,21	0,05	0,15	

En negrita y en cursiva se hallan las correlaciones significativas ( $p < 0,05$ ).

En este estudio, se pudo comprobar que la relación entre los indicadores de mineralización y las diferentes fracciones orgánicas de los suelos sería dependiente del contenido de fracción fina de los mismos (limo+arcilla). Es por esto, que el análisis de clúster permite separar suelos con variabilidad edáfica en condiciones similares para lograr comparaciones certeras. Si no se hubieran agrupado los suelos por sus fracciones orgánicas se podría enmascarar alguna relación sobre los indicadores rápidos de mineralización.

### Conclusiones

El Nan resultó ser el indicador de mineralización más sensible ante diferencias edáficas de los sitios, debido a que se encontraron diferencias significativas entre ambos grupos de suelos.





## XXV CONGRESO ARGENTINO DE LA CIENCIA DEL SUELO

*“Ordenamiento Territorial: un desafío para la Ciencia del Suelo”*

*Río Cuarto, 27 de Junio - 01 de Julio de 2016*

---

El Nan y Nhid están relacionados a las fracciones orgánicas en estos suelos donde los aportes de MOP por parte de los residuos de los cultivos son erráticos por las condiciones climáticas característicos del SOB, sin embargo, la relación con los diferentes pools de C y N, lábiles o recalcitrantes son dependientes de la protección física producida por el limo+arcilla.

Esto permite concluir que las relaciones entre los indicadores estudiados y las fracciones orgánicas difieren según las condiciones edáficas y deben ser calibradas en base a estas fracciones. El análisis de clúster permitió lograr este agrupamiento en base a varias fracciones orgánicas y debería ser usado para comparar suelos con iguales condiciones.

### **Bibliografía**

Angers, DA; N. Bissonnette; A Logbre; N Samson. 1993. Microbial and biochemical changes induced by rotation and tillage in a soil under barley production. *Can. J. Soil Sci.* 73:39-50.

Balesdent, J; C Chenu & M Balabane. 2000. Relationship of soil organic matter dynamics to physical protection and tillage. *SoilTill. Res.* 53:215-230.

Balzarini, MG; L González; M Tablada; F Casanoves; JA DiRienzo; CW Robledo. 2008. *Infostat: Manual del Usuario*. Córdoba. Editorial Brujas. 336 pp.

Benbi, DK & J Richter. 2002. A critical review of some approaches to modeling nitrogen mineralization. *Biol.Fert. Soils* 35: 168-183.

Bray, R & L Kurtz. 1945. Determination of total, organic and available forms of phosphorus in soil. *Soil Sci.* 59:39-45.

Bremner, AE & CS Mulvaney. 1982. Total nitrogen. In: C Pageet al. (eds.) *Methods of soil analysis, Part 2*. Pp. 595-624. American Society of Agronomy and Soil Science Society of American Journal. Madison, Wisconsin, EEUU. 1159 pp.

Cheshire, MV. 1979. *Nature and origin of carbohydrates in soils*. Londres, Inglaterra. Editorial Academic Press Inc. 216 pp.

Cozzoli MV; N Fioriti; G Studdert; GF Dominguez; MJ Eiza. 2010. Nitrogen released by anaerobic incubation and organic carbon fractions in macro- and microaggregates under cropping systems. *Ci. Suelo*, 28:155-167.



## XXV CONGRESO ARGENTINO DE LA CIENCIA DEL SUELO

*“Ordenamiento Territorial: un desafío para la Ciencia del Suelo”*

*Río Cuarto, 27 de Junio - 01 de Julio de 2016*

---

Di Rienzo, JA; F Casanoves; MG Balzarini; L Gonzalez; M Tablada & CW Robledo. 2013. InfoStat versión 2013. Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina. URL <http://www.infostat.com.ar>.

Duval ME; JA Galantini; JO Iglesias; S Canelo; JM Martinez; L Wall. 2013. Analysis of organic fractions as indicators of soil quality under natural and cultivated systems. *Soil Till. Res.* 131:11-19.

Echeverría, H; R Bergonzi; J Ferrari. 1994. Un modelo para estimar la mineralización de nitrógeno en suelos del sudeste de la provincia de Buenos Aires (Argentina). *Ci. Suelo* 12:56-62.

Echeverría, HE; RA Strada; G Studdert. 2000. Métodos rápidos de análisis de plantas para evaluar la nutrición nitrogenada del cultivo de trigo. *Ci. Suelo* 18:105-114.

Fageria, NK & VC Baligar. 2005. Enhancing nitrogen Use efficiency in crop plants. *Adv. Agron.* 88:97-185.

Ford GW & DJ Greenland. 1968. The dynamics of partly humified organic matter in some arable soils. In: JW Holmes(ed) Transactions of the International Congress of Soil Science, 9th, Adelaide. Pp. 403-410. Editorial El Sevier. Nueva York, EEUU.

Galantini, JA; N Senesi; G Brunetti & R Rosell. 2004. Influence of texture on the nitrogen and sulphur status and organic matter quality and distribution in semiarid Pampean grassland soils. *Geoderma* 123: 143-152.

Gianello, C & JM Bremner. 1986. Simple chemical method of assessing potentially available organic nitrogen in soil. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 17: 195-214.

Gonzalez-Chavez, MA; JA Aitkenhead-Peterson; TJ Gentry; D Zuberer; F Hons & R Loeppert. 2010. Soil microbial community, C N, and P responses to long-term tillage and crop rotation. *Soil Till. Res.* 106:285-293.

Griffin, TS; CW Honeycutt; SL Albrecht; KR Sistani; HA Torbert; BJ Wienhold; BL Woodbury; RK Hubbard & JM Powell. 2008. Nationally-coordinated evaluation of soil nitrogen mineralization rate using a standardized aerobic incubation protocol. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 39: 257-268.

Puget, P; DA Angers & C Chenu. 1999. Nature of carbohydrates associated with water-stable aggregates of two cultivated soils. *Soil Biol. Biochem.* 31: 55-63.

Reussi Calvo, NI; HE Echeverría; H Sainz Rozas; A Berardo & N Diovisalvi. 2011.





## XXV CONGRESO ARGENTINO DE LA CIENCIA DEL SUELO

*“Ordenamiento Territorial: un desafío para la Ciencia del Suelo”*

*Río Cuarto, 27 de Junio - 01 de Julio de 2016*

---

Nitrógeno incubado en anaerobiosis: ¿Herramienta complementaria para el diagnóstico de nitrógeno en trigo? En: Simposio Fertilidad. Rosario, Argentina. IPNI Publ. p. 207–210.

Reussi Calvo, NI; H Sainz Rozas; HE Echeverría & A Berardo. 2013. Contribution of anaerobiosis incubated nitrogen to the diagnosis of nitrogen status in spring wheat. Agron. J. 105:321-328.

St. Luce, MS; JK Whalen; N Ziadi; BJ Zebarth. 2011. Nitrogen dynamics and indices to predict soil nitrogen supply in humid temperate soils. Adv.Agron. 112:55-102.

Stanford, G & S Smith. 1972. Nitrogen mineralization potentials of soils. Soil Sci. Soc. Am. Proc. 36: 465-472.

Walley, F; T Yates; JW Groenigen & C Van Kessel. 2002. Relationship between soil nitrogen availability indices, yield, and nitrogen accumulation of wheat. Soil Sci. Soc. Am. J. 66: 1549-1561.

Wander, MM. 2004. Soil organic matter fractions and their relevance to soil function. In: F Magdoff et al. (eds) Soil Organic Matter in Sustainable Agriculture. Pp. 67-102. Editorial CRC Press. Boca Raton, Florida, EEUU. 412 pp.

Wang, W; CJ Smith; PM Chalk; D Chen. 2001. Evaluating chemical and physical indices of nitrogen mineralization capacity with an unequivocal reference. Soil Sci. Soc. Am. J. 65:368-376.

Waring, SA & JM Bremner. 1964. Ammonium production in soil under waterlogged conditions as an index of nitrogen availability. Nature 201:951-952.