

DEPENDENCIA ESPACIAL DEL POTENCIAL DE NITRÓGENO DISPONIBLE DEL SUELO EN DOS SITIOS CONTRASTANTES

SPATIAL DEPENDENCE OF SOIL POTENTIALLY AVAILABLE NITROGEN IN TWO CONTRASTING SITES

Carolin Córdova*¹, Carlos Magna¹, Juan Alberto Barrera¹, y Erick Zagal¹

¹ Departamento de Suelos y Recursos Naturales, Facultad de Agronomía, Universidad de Concepción, Avenida Vicente Méndez 595, Chillán, Chile.

* Autor de correspondencia Email: cacordov@udec.cl

RESUMEN

La alta variabilidad del nitrógeno (N) en el suelo afecta la aplicación efectiva de fertilizantes nitrogenados. El objetivo de esta investigación fue determinar y evaluar la dependencia espacial del N en dos tipos de suelo. Para ello se utilizó un diseño espacial anidado optimizado, con 16 estaciones de muestreo, y en direcciones aleatorias se tomaron muestras de suelo (0-23 cm) a intervalos de distancia de 1,5; 4,5; 13,5; 40,5; y 121,5 m. Los suelos evaluados fueron un Andisol y un Inceptisol (2 x n = 98), en los que se midió el potencial de nitrógeno disponible (PND) a través de incubación anaeróbica de suelo por 7 días a 40°C ($PND = NH_4^+$ día 7 - NH_4^+ día 1). La dependencia espacial del PND en cada uno de los sitios fue establecida mediante la acumulación de varianzas de cada distancia, calculada a través de un análisis de máxima probabilidad residual (REML), y posterior aproximación al variograma. Los resultados mostraron un rango amplio de valores en ambos sitios. El sitio Andisol registró un elevado PND, con un valor promedio de 32,92 mg NH_4^+ kg⁻¹, cinco veces mayor que en el Inceptisol, lo que se explicó principalmente por un mayor contenido de materia orgánica. La dependencia espacial del PND para ambos sitios se obtuvo a intervalos de 13,5 y 40,5 m, logrando cuantificar un 59% de la variabilidad del proceso en el sitio Andisol, y tan sólo un 35% en el sitio Inceptisol.

Palabras clave: suministro de nitrógeno del suelo, Andisol, Inceptisol, variograma, muestreo anidado.

ABSTRACT

Soil nitrogen (N) variability affects the effective application of N fertilizers. The objective of this research was to determine and assess the spatial dependence of soil N in two different soils using spatial sampling and geostatistics fundamentals. An optimized nested sampling design was applied in two sites, using 16 main stations from where soil samples (0 - 23 cm) were obtained at 1.5, 4.5, 13.5, 40.5, and 121.5 m, at random directions. Soil samples were collected from an Andisol and an Inceptisol (2 x n = 98), and the potentially available N (PAN) was measured by anaerobic soil incubation for 7 days at 40°C ($PAN = NH_4^+$ day 7 - NH_4^+ day 1). The PAN variance components from each distance were calculated by residual maximum likelihood (REML), and then accumulated to plot an approach to the variogram. The results showed a wide range of values for PAN at both sites. The Andisol site registered high PAN levels, with a mean value of 32.92 mg NH_4^+ kg soil⁻¹, which was five times larger than in the Inceptisol soil, probably associated with a larger soil organic matter content. The limit of the spatial dependence was 13.5 m for the Andisol, and 40.5 m for the Inceptisol soil, corresponding to the 59% and 35% of the process variance, respectively.

Key words: soil nitrogen supply, Andisol, Inceptisol, variogram, nested sampling.

INTRODUCCIÓN

El nitrógeno (N) es uno de los nutrientes más importantes para el crecimiento y la productividad de los cultivos y la actividad microbiana en los ecosistemas terrestres (Urakawa et al., 2014). Sólo una fracción del N total presente en el suelo está directamente disponible para plantas y microorganismos (menor o igual al 5%), principalmente a la forma de N inorgánico como nitrato (NO_3^-) y amonio (NH_4^+), y la mayor parte de N se encuentra en formas orgánicas ligadas a la MO de suelo, la que a su vez se transforma lentamente a formas inorgánicas disponibles a través del proceso de mineralización (Ros et al., 2011; Clivot et al., 2017). La disponibilidad de N del suelo (NH_4^+ y NO_3^-) para el crecimiento de los cultivos depende naturalmente de la actividad microbiológica del suelo (Robertson y Groffman, 2015), de la fijación biológica de N atmosférico (N_2) y de la mineralización de la materia orgánica (MO). Esta cantidad disponible de N en el suelo es generalmente insuficiente para cubrir el requerimiento de N de los cultivos (Knicker, 2011); por ello a través de la aplicación de dosis de N-fertilizante se maneja el incremento de esta disponibilidad (Lu et al., 2018).

La mayoría de los suelos son deficientes en N, lo que resulta en un factor restrictivo para el crecimiento y rendimiento de los cultivos (Antal et al., 2010). La corrección de la limitación en la disponibilidad de N en el suelo ha conducido al aumento considerable en la utilización de fertilizantes nitrogenados en la agricultura para mejorar la producción. El aumento del uso de fertilizantes nitrogenados ha registrado un incremento de alrededor de diez veces en los últimos 50 años, desde 10 Tg N año⁻¹ hasta aproximadamente 100 Tg N año⁻¹ (Robertson y Vitousek, 2009). Según la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO, 2015), la demanda mundial de fertilizantes nitrogenados aumenta de 113 toneladas en 2014 a 119 toneladas en 2018, a una tasa de crecimiento de 1,4%.

Existe preocupación por la contaminación generada por aplicaciones desmedidas de fertilizantes sintéticos. Es conocido que las adiciones elevadas de N a los ecosistemas tienen consecuencias de gran alcance para el medio ambiente, incluido el cambio climático, las emisiones de gases de efecto invernadero, la pérdida de especies, y amenazas para la salud, (Nemergut et al., 2008; Ramírez et al., 2010). Para Guo et al. (2010) los grandes suministros de urea en la fertilización de los suelos han originado pérdidas de nitrato por lixiviación, aumento de la acidez del suelo y otros problemas ambientales. La

racionalización en la aplicación de fertilizantes es un tema importante para la agricultura sostenible debido a que puede reducir los efectos negativos sobre el medio ambiente (Zhang et al., 2015). De esta manera, existe necesidad de encontrar procedimientos que permitan mejorar la eficiencia de uso de los fertilizantes nitrogenados para maximizar el beneficio económico y minimizar el riesgo de contaminación ambiental.

Un enfoque básico para evitar la sobrefertilización de los cultivos es considerar la capacidad de suministro del suelo, aplicando menores dosis de fertilizantes en aquellos suelos con alto potencial de suministrar N, sujeto a otros factores como oportunidad de la aplicación y forma química de los fertilizantes. La capacidad de los suelos de suministrar N a las plantas depende del proceso de mineralización (St. Luce et al., 2011). Sin embargo, la mineralización del N es un proceso variable en espacio y tiempo, y su cuantificación es posible mediante una adecuada intensidad de muestreo y uso de técnicas geoestadísticas (Ortega y Mardonez, 2005). A través de estas herramientas se obtiene una figura específica de los niveles espaciales de un nutriente (u otra propiedad del suelo) en un sitio o región, contrario a lo que produce un muestreo convencional usando muestras de suelo compuestas (Webster et al., 2006).

Para la aplicación de geoestadística es importante considerar la densidad de muestreo en relación con la escala espacial de variación (Webster et al., 2006), es decir realizar muestreos de suelo a determinados intervalos de distancia para determinar la dependencia espacial de la variable en estudio. El intervalo de distancia donde una variable está espacialmente autocorrelacionada se denomina "rango", también llamada la distancia donde se produce la dependencia espacial, y es uno de los parámetros del variograma. La dependencia espacial indicaría el intervalo de muestreo óptimo para describir la variabilidad espacial de una propiedad del suelo como la mineralización de N, por ejemplo. Esto se puede determinar directamente a través de un muestreo espacial a intervalos de distancia seleccionados sin información, o bien, se puede optimizar el muestreo espacial para calcular el variograma a través de un muestreo previo.

Una de las técnicas que permite conocer la dependencia espacial de una variable corresponde al muestreo espacial anidado; este tipo de muestreo permite la exploración o el estudio de varias distancias simultáneamente, que se eligen de acuerdo a factores que se piensan podrían influir en el proceso físico-químico que se quiere estudiar. La acumulación de la varianza proveniente de las diferentes escalas

de muestreo estudiadas y aplicadas, determina la varianza total de una variable (Webster et al., 2006; Lark, 2011). En particular, cada componente de varianza en relación a la varianza del proceso, puede ser asociado a la escala o intervalo de muestreo usado, proporcionando una aproximación al variograma, y con ello la dependencia espacial de una variable puede ser estimada para subsecuentemente realizar un muestreo espacial a distancias regulares y calcular más acertadamente el variograma (Córdova et al., 2012; Córdova et al., 2016; Xiong et al., 2016), y consecuentemente usar técnicas de interpolación espacial para determinar áreas similares y distintas dentro de un sitio o región de estudio. El estudio de varios intervalos de distancia simultáneamente reduce el costo de la aplicación de un muestreo sin información sobre la escala de variación de una variable (Xiong et al., 2016).

Dado que el N disponible del suelo producto de la mineralización de la materia orgánica del suelo presenta una alta variabilidad espacial, y que su dependencia espacial no ha sido ampliamente estudiada, el objetivo de este estudio fue evaluar y determinar la dependencia espacial del nitrógeno en dos tipos de suelo, de contenidos contrastantes de materia orgánica, mediante la ejecución de un muestreo espacial anidado. De esta manera se espera aportar al conocimiento de aplicaciones variables de fertilizantes, considerando la variabilidad espacial del suelo en planes de manejo sitio-específico, que consideren la predicción espacial de las necesidades de nitrógeno a escala de campo.

MATERIALES Y MÉTODOS

Descripción de los sitios de estudio.

El estudio se realizó en dos sitios con características edafológicas diferentes, uno de suelo de origen volcánico y otro de suelo de origen aluvial (Tabla 1). El análisis químico de los suelos (Tabla 2) mostró diferencias principalmente en el contenido de MO, que fue alrededor de cuatro veces mayor en la estrata superior de 0-28 cm del sitio Andisol. Esto permitió la evaluación de la hipótesis respecto a la mayor mineralización de nitrógeno en suelos de mayor contenido de MO.

Por otra parte el N total y la relación carbono nitrógeno (C/N) también fueron superiores en la estrata más superficial del suelo Andisol, mientras que el total de bases fue aproximadamente dos veces superior en el sitio Inceptisol.

Estrategia de muestreo de suelos

Para la recolección de las muestras en ambos sitios, se utilizó un muestreo espacial anidado optimizado (Lark, 2011; Wester y Lark, 2013), estableciendo tres puntos en el terreno triangulados como figura base (Fig. 1), y desde donde cada uno de sus vértices se marcaron 16 puntos de muestreo que originaran los intervalos de distancia de muestreo en estudio para la obtención de las muestras de suelo (Fig. 1). Las fuentes de variación fueron intervalos de distancias de 1,5 m; 4,5 m; 13,5 m; 40,5 m y 121,5 m, con variaciones de dirección al azar entre 0 a 360° (Fig. 1). La figura de tres bases (triángulo) se repitió dos veces en el campo, y las bases

Tabla 1. Características generales de los sitios de estudio donde se analizó la dependencia espacial del potencial de nitrógeno disponible del suelo.

Table 1. General conditions of the study sites for the analysis of the spatial dependence of soil potentially available nitrogen.

	Suelos	
	Andisol	Inceptisol
Génesis	Suelo derivado de cenizas volcánicas.	Suelo formado a partir de sedimentación lacustre.
Fisiografía	Precordillera de los Andes, pendiente 3 %, 268 msnm, 1500 mm de precipitación anual.	Depresión, intermedia, pendiente de 1%, 153 msnm, 600 mm de precipitación anual.
Localidad	El Carmen, Región del Biobío (36° 59'S 71° 59' W)	Palmilla, Región del Libertador General Bernardo O'Higgins (34° 33'S; 71° 22' W)
Rotación de cultivos	Avena-trigo	Maíz-trigo-alfalfa-barbecho

Tabla 2. Propiedades químicas de los suelos en los sitios de estudio donde se analizó la dependencia espacial del potencial de nitrógeno disponible del suelo.**Table 2. Soil chemical properties of the study sites for the analysis of the spatial dependence of soil potentially available nitrogen.**

Profundidad (cm)	Andisol		Inceptisol	
	0 - 28	28 - 95	0 - 20	20 - 110
pH suelo	6,17	6,53	6,36	6,60
Materia orgánica suelo (%)	11,09	2,85	2,49	0,85
N-NO ₃ ⁻ (mg kg ⁻¹)	14,30	26,60	15,50	12,90
P (Olsen) (mg kg ⁻¹)	14,60	1,10	10,10	6,90
K disponible (mg kg ⁻¹)	324,50	51,90	191,70	157,70
K intercambiable (cmol kg ⁻¹)	0,83	0,13	0,49	0,40
Ca intercambiable (cmol kg ⁻¹)	6,03	8,04	12,75	18,70
Mg intercambiable (cmol kg ⁻¹)	1,17	1,64	2,84	3,82
Na intercambiable (cmol kg ⁻¹)	0,50	0,54	0,70	0,78
Total bases (cmol kg ⁻¹)	8,53	10,36	16,77	23,71
Al intercambiable (cmol kg ⁻¹)	0,27	0,17	0,08	0,01
CICE (cmol kg ⁻¹)	8,79	10,52	16,86	23,72
Al saturación (%)	3,04	1,59	0,48	0,03
K saturación (%)	9,46	1,26	2,92	1,71
Ca saturación (%)	68,58	76,40	75,64	78,87
Mg saturación (%)	13,28	15,62	16,83	16,12
N total (%)	0,41	0,15	0,10	0,04
Relación C/N	15,60	11,30	13,80	11,30
Al extraíble (mg kg ⁻¹)	396	1077	43,10	73,20

CICE: Capacidad Intercambio Catiónico Efectiva.

fueron separadas a 121,5 m entre sí (Fig. 1). A partir de cada base se organizaron en forma jerárquica los demás intervalos de distancia, dando como resultado un total de 96 muestras de suelo, en vez de las 486 de un esquema anidado tradicional balanceado. El muestreo anidado balanceado considera la réplica de cada intervalo de distancia en estudio para aumentar los grados de libertad en el análisis. Sin embargo, la distribución en triángulo de los intervalos de distancia aseguran una intensidad suficiente de muestreo, que no afecta la confiabilidad de los resultados (Webster y Lark, 2013). La aplicación del muestreo desbalanceado es más conveniente porque el menor número de muestras de suelo disminuye los tiempos de medición, y los costos experimentales, sin dañar la calidad del estudio. En este estudio se tomaron dos muestras extras por triángulo (n = 98).

El muestreo de los dos sitios se realizó en la estación de otoño, y cada muestra se extrajo mediante un barreno agrológico a una profundidad de 23 cm (por considerarse la estrata arable). Las muestras se llevaron a laboratorio donde se mantuvieron refrigeradas hasta el

análisis del potencial de nitrógeno disponible (PND).

Determinación del potencial de nitrógeno disponible

Para cuantificar el PND se utilizó el método desarrollado por Waring y Bremner (1964) modificado por Keeney y Bremner (1966), el que consistió en la incubación de suelo bajo condiciones de completa anaerobiosis durante un período de siete días a 40°C. Esta técnica permite bloquear el proceso de nitrificación, con el fin de cuantificar sólo el NH₄⁺ mineralizado. Las cantidades mineralizadas bajo estas condiciones de laboratorio pueden ser correlacionadas con la cantidad de N mineralizado por el suelo en una estación de crecimiento. Para su determinación se realizó una extracción de NH₄⁺ al inicio y otra al final de la incubación (7 días) en cada una de las muestras de suelo de ambos sitios de estudio (n = 98 x dos sitios de estudio), y determinando la diferencia entre las extracciones final e inicial se cuantificó el PND en cada muestra.

La extracción inicial se realizó usando 5 g de suelo seco y 25 mL de KCl (2M), que fue agitado

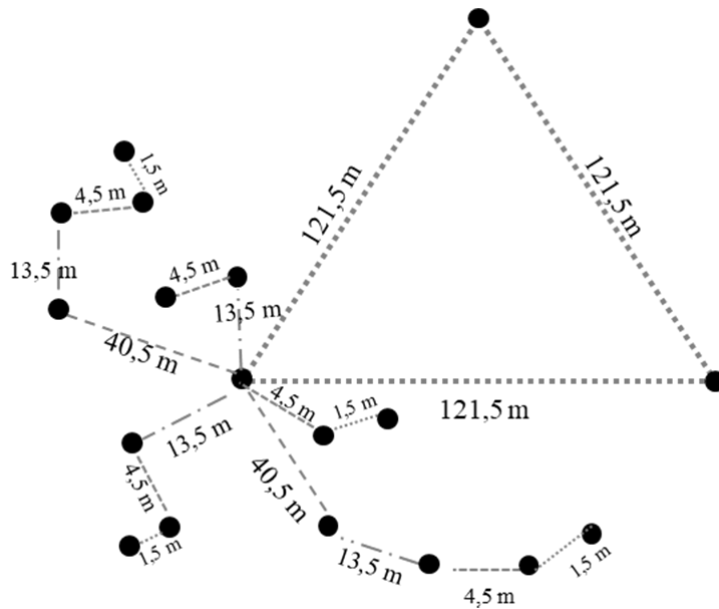


Fig. 1. Esquema del diseño espacial optimizado de muestreo anidado aplicado en dos sitios de estudio para el análisis de la dependencia espacial del potencial de nitrógeno disponible del suelo. Los puntos de color oscuro representan los puntos de muestreo de suelo. Los intervalos de distancia representados se repitieron en direcciones aleatorias en los dos otros vértices de muestreo. Las distancias no están dibujadas a escala.

Fig. 1. Scheme of the optimized spatial nested design applied in the field in two study sites to analyse the spatial dependence of the soil potentially available nitrogen. Dark dots represent soil sampling points. Sampling intervals were replicated in the two other sampling points at the vertex of the figure, but following random directions. Sampling distances are not made to scale.

por 60 min. Después de decantar las muestras, se trasvasió el sobrenadante y se centrifugaron a 6.000 rpm por 5 min. Posteriormente se filtró el extracto a través de filtros Whatman 42, y en ellos se procedió posteriormente al desarrollo de color. Con pipeta se tomó una alícuota de 2 mL de cada extracto en diferentes tubos de ensayo, y se adicionaron 2 mL de reactivo Nessler y 3 mL de NaOH (3M). La operación se repitió con las concentraciones estándares de amonio: 0, 2, 5, 10 y 20 mg L⁻¹ y con la solución extractante de KCl. Se esperaron 20 min para el desarrollo del color y se leyó en el espectrofotómetro (Rayleigh UV-1601, Beijing Beifen-Ruili Analytical Instrument Co. Ltd, China) a longitud de onda de 490 nm. Las concentraciones estándares para generar la curva de calibración, y luego las absorbancias de cada muestra.

Para conocer la cantidad de NH₄⁺ del suelo mineralizada anaeróbicamente, se usó la misma cantidad de suelo incubada con 12,5 mL de agua sin adición de KCl, por lo que al final de la incubación se adicionó el resto de la solución más concentrada (12,5 mL de solución de KCl 4M) para alcanzar los 25 mL de KCl 2M.

Análisis del diseño anidado

La medición del PND en las muestras de suelo dispuestas en el diseño anidado de muestreo permitió establecer la variabilidad de esta propiedad dentro del espacio muestreado a diferentes escalas de muestreo (intervalos de distancia: 1,5; 4,5; 13,5; 40,5; y 121,5 m). Para cada escala de variación se calculó el componente de varianza, y se logró elaborar una aproximación al variograma, que determinó la dependencia espacial del PND de cada suelo. El procesamiento de los datos se realizó mediante el programa Genstat (VSN International, 2019) del cual se obtuvo inicialmente un resumen estadístico de las dos poblaciones de datos (N-volcánico y N-aluvial) con el fin de conocer sus medidas de tendencia central, varianza y analizar su normalidad. Seguidamente, se aplicó el análisis de máxima probabilidad residual (REML, Residual Maximum Likelihood), que determinó los componentes de varianza para cada uno de los intervalos, que al acumularse dieron origen al variograma aproximado del PND de cada suelo.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Análisis estadístico preliminar

Los resultados del PND obtenido en laboratorio se muestran en la Tabla 3. Se observaron mayores valores de PND en el suelo Andisol. El 51% de las muestras correspondientes al sitio Inceptisol presentaron nula actividad, así que estos valores finalmente no fueron considerados para el análisis estadístico, disminuyendo el set de datos de 97 a 49, mientras que para el sitio Andisol se mantuvo la totalidad de los datos. Al analizar las medidas de tendencia central para ambos sitios de suelo, la media del PND para el sitio Andisol correspondió a 32,92 mg N-NH₄⁺ kg suelo⁻¹, valor alrededor de cinco veces mayor que el registrado en el sitio Inceptisol con tan sólo 7,23 mg N-NH₄⁺ kg suelo⁻¹. Los resultados de Rojas (1992), quien evaluó la cantidad de N potencialmente mineralizable en siete tipos de suelos chilenos, concluyeron que los suelos de origen volcánico poseen una mayor tasa de mineralización que los no volcánicos. Según Sanfuentes y Rodríguez (1993), ello está directamente relacionado con la cantidad de MO, que para suelos derivados de cenizas volcánicas pueden estar en un rango de 2,6 a 31,2%, a diferencia de suelos aluviales que poseen un rango menor, de 1,7 a 4,2%.

En el hemisferio norte, Baxter et al. (2003) obtuvieron valores medios de PND de 13,5 mg kg⁻¹ (0 a 0,3 m), 6,8 mg kg⁻¹ (0,3 a 0,6 m), y 2 mg kg⁻¹ (0,6 a 0,9 m), y concluyeron que la mayor tasa de mineralización de N ocurrió en la profundidad de 0-0,3 m, con una media de 13,5 mg kg⁻¹ PND, un mínimo de 2,0 mg kg⁻¹ PND, y máximo de 59

mg kg⁻¹ PND, lo que muestra el comportamiento variable del PND en un suelo, siendo superior a menor profundidad, lo que coincide con lo reportado por Benintende et al. (2008), quienes encontraron que el 43% de la mineralización ocurre en los horizontes superficiales de suelo.

Respecto a la dispersión de los valores del PND, en el sitio Andisol presentaron un mayor rango, con 90,04 mg N-NH₄⁺ kg suelo⁻¹ y una mayor desviación estándar de 17,36 mg N-NH₄⁺ kg suelo⁻¹. En comparación, el sitio Inceptisol mostró un rango más estrecho de sólo 37,35 mg N-NH₄⁺ kg⁻¹ suelo⁻¹ y menor desviación estándar con 7,68 mg N-NH₄⁺ kg suelo⁻¹. En tanto el coeficiente de variación para el sitio Andisol fue menor con 52,74% comparado con el 106,3%, del sitio Inceptisol, lo que expresó una alta variabilidad del PND, alrededor de dos veces superior, que se justifica por la existencia de valores extremos que difirieron bastante del promedio.

El PND en un suelo depende en gran medida de la mineralización de la MO, la que a su vez está influenciada, entre otros factores, por la historia agrícola (Genovese et al., 2009), las prácticas de manejo (Studdert y Echeverría, 2006) y las condiciones climáticas (Álvarez y Steinbach, 2011). En ambos sitios de estudio, las cantidades de MO (%) encontradas a una profundidad de 0 - 28 cm establecieron una diferencia cuatro veces superior en el sitio Andisol, con un 11% versus tan sólo un 2,49% del sitio Inceptisol (Tabla 2), lo que podría ser explicado por las mayores cantidades PND reportadas en el sitio con suelo Andisol.

Tabla 3. Resumen estadístico del potencial de nitrógeno disponible (PND) en un sitio de suelo Andisol y un sitio de suelo Inceptisol

Table 3. Statistical summary for the potentially available nitrogen measured at Andisol and Inceptisol soil sites.

	Andisol			Inceptisol			
	PND	Log PND	Raíz cuadrada PND	PND	PND	Log PND	Raíz cuadrada PND
N° muestras	98	98	98	97	49	49	49
Media	32,924	1,500	5,529	3,653	7,231	0,600	2,350
Mediana	29,601	1,513	5,441	0,570	4,650	0,667	2,160
Mínimo	1,402	0,644	1,184	0,000	0,570	-0,244	0,750
Máximo	91,438	1,975	9,562	37,920	37,920	1,579	6,160
Desviación estándar	17,364	0,233	1,542	6,536	7,683	0,517	1,320
CV (%)	52,740	15,514	27,884	178,935	106,300	86,060	56,080
Asimetría	0,783	-0,751	-0,004	2,586	1,744	-0,147	0,730
Curtosis	0,429	1,099	0,003	7,678	3,588	-1,094	-0,170

PND: valor del análisis medido en el laboratorio (mg N-NH₄⁺ kg suelo⁻¹); CV: Coeficiente variación.

Análisis de la normalidad de los datos

Uno de los principales pilares de la geostatística se sustenta en la estacionariedad, concepto que asume que la distribución del proceso aleatorio es invariable en cualquier punto del espacio, es decir, que el valor de una variable aleatoria (Z) en un determinado punto (x) es constante en la totalidad de los puntos $Z(x_1, x_2, \dots, x_n)$ (Corstanje et al., 2008). Esta teoría en la práctica es poco común o muy difícil de conseguir, sobre todo por la influencia de la distancia que establece una alta probabilidad de encontrar valores extremos. Por ello es pertinente que previo al cálculo del variograma se analice la normalidad de los datos, para evitar valores erráticos e irreales en la aproximación al variograma. Para evitar este problema en ambos sitios de estudio se decidió realizar cuatro transformaciones, con el fin de corregir la distribución normal de los datos, utilizando logaritmo natural, raíz cuadrada + 0,5, raíz cuadrada y logaritmo base 10; estas dos últimas mostraron valores más aceptables con los cuales finalmente se trabajó (Tabla 3).

Para analizar la normalidad de los datos se consideraron las medidas de tendencia central obtenidas del análisis estadístico preliminar; se observó que en ambos sitios los valores de media y mediana fueron relativamente cercanos con 32,92 mg N-NH₄⁺ kg suelo⁻¹ y 29,60 mg N-NH₄⁺ kg suelo⁻¹ en el sitio Andisol (n = 98) y con 7,23 mg N-NH₄⁺ kg suelo⁻¹ y 4,65 mg N-NH₄⁺ kg suelo⁻¹ en el Inceptisol (n = 49). Esta condición de insuficiente similitud entre los valores estableció un potencial problema en la distribución normal de los datos para ambos sitios, lo que posteriormente se revirtió al utilizar las transformaciones antes mencionadas. En el caso de la transformación de logaritmo base 10, las medidas de tendencia central mostraron una gran mejoría con cifras prácticamente idénticas. En el sitio Andisol los valores de media y mediana se establecieron

en 1,50 mg N-NH₄⁺ kg suelo⁻¹ y 1,51 mg N-NH₄⁺ kg suelo⁻¹, respectivamente. En el sitio de suelo Inceptisol el comportamiento fue muy similar alcanzando valores de 0,60 mg N-NH₄⁺ kg suelo⁻¹ para la media y 0,66 mg N-NH₄⁺ kg suelo⁻¹ para la mediana. Del mismo modo los valores coeficiente de asimetría y curtosis se corrigieron dentro de los parámetros aceptables para una distribución normal.

Las transformaciones realizadas en los set de datos de ambos sitios de estudio mostraron una marcada heterogeneidad en sus varianzas, pero mantuvieron valores similares de normalidad en comparación a los datos sin transformar. Para llevar a cabo el análisis REML se decidió trabajar con los datos de la transformación logaritmo base 10, los que posteriormente se procesaron mediante el programa Genstat (VSN International, 2019).

Aproximación al variograma

A través de análisis REML se obtuvieron los diferentes componentes de varianza para cada uno de los intervalos de distancia (1,5; 4,5; 13,5; 40,5; y 121,5 m) de los dos suelos. Para obtener la varianza total, equivalente al 100%, cada componente de varianza fue adicionado desde el menor al mayor intervalo de distancia, de manera jerárquica, comenzando desde la menor distancia de 1,5 m (Tabla 4).

Los resultados indicaron que para el sitio Andisol la varianza total, equivalente al 100%, correspondió a un valor de 0,7630 y se explicó sólo por las distancias superiores a 1,5 m, concentrándose la mayor variabilidad en los intervalos de distancia de 13,5 y 40,5 m con un 59% de la varianza total. En comparación, el sitio de suelo Inceptisol obtuvo un valor de varianza total de 0,1644 y se comportó de la misma manera a intervalos de 13,5 y 40,5 m, pero con menor porcentaje de la varianza total respecto al sitio Andisol, sólo con un 34% y 36%, respectivamente.

Tabla 4. Componentes de varianza del PND, obtenidos mediante un diseño espacial anidado optimizado en un sitio de suelo Andisol y un sitio de suelo Inceptisol.

Table 4. Components of variance for the potentially available nitrogen indicator under a spatial nested sampling design measured at Andisol and Inceptisol soil sites.

Estado	Andisol					Inceptisol		
	Distancia (m)	Distancia (log m)	Componente varianza	Varianza acumulada	Porcentaje del total varianza	Componente varianza	Varianza acumulada	Porcentaje del total varianza
1	121,5	2,1	0,313	0,763	100	0,105	0,164	100
2	40,5	1,6	0,000	0,450	59	0,003	0,059	36
3	13,5	1,1	0,250	0,450	59	0,048	0,055	34
4	4,5	0,7	0,200	0,200	26	0,000	0,007	5
5	1,5	0,2	0,000	0	0	0,007	0,007	5

Para la elaboración de la aproximación al variograma de ambos sitios, se utilizó cada una de las distancias de muestreo transformada a logaritmo base 10 y su porcentaje de varianza correspondiente (Tabla 4). Su gráfica permitió determinar el límite de dependencia espacial en la distancia donde se alcanzó la meseta. En el caso de ambos sitios las gráficas presentaron una distribución similar alcanzando la meseta en la distancia de 13,5 m y manteniéndose lineal hasta los 40,5 m (Figs. 2 y 3).

En el variograma del sitio de suelo Andisol se observó que el menor intervalo de distancia, correspondiente a < 1,5 m, reveló una nula variabilidad, comportamiento inusual debido a que generalmente aparece una varianza asociada al error intrínseco de la variable (varianza pepita), pero que se justifica considerando que a cortas distancias la probabilidad de obtener un valor parecido entre dos puntos es alta, por lo que disminuye la variación y varianza. Además el muestreo en campo y posterior método desarrollado en laboratorio fue realizado con especial cuidado y precisión, siguiendo las normas establecidas, de manera de no afectar los resultados e inducir errores. El siguiente intervalo de distancia de < 4,5 m representó sólo un 26% de la varianza, situación diferente a los intervalos superiores de 13,5 y 40,5 m, que mostraron un 33% más de variabilidad, con un 59% de la varianza total.

En tanto para el sitio Inceptisol las distancias

menores de 1,5 y 4,5 m explicaron una baja proporción de la varianza total, alrededor del 5%, lo que significaría una alta probabilidad de encontrar un valor similar de PND a distancias cortas.

Al aumentar el intervalo de distancia, crece la autocorrelación espacial entre PND y la distancia, tal como sucedió con el intervalo de distancia siguiente de 13,5 m, que reveló un 29% más de varianza que distancias < 4,5 m y donde se alcanzó un tercio de la varianza total. El intervalo de distancia correspondiente a 40,5 m sólo mostró un 2% más de varianza que el de 13,5 m, lo que muestra una baja diferencia al aumentar el muestreo en 27 m. Esto indica que la dependencia espacial del PND tanto para el sitio Andisol como Inceptisol se corresponde a intervalos de distancia mayores a 4,5 m, por lo que las distancias de 13,5 y 40,5 m establecen un buen parámetro de muestreo posterior, las cuales aseguran entonces que las posibles cantidades obtenidas entre dos puntos de muestreo sean contrastantes, y por lo tanto más representativas. Aun así, es recomendable que la distancia de muestreo óptima sea la mitad del rango (Webster et al., 2006), y en este caso para ambos sitios el intervalo de distancia de < 40,5 m que corresponde al de mayor variabilidad sugiere entonces un muestreo en terreno a intervalos de distancia de 20 m.

Los intervalos de distancias evaluados en ambos sitios mostraron que en distancias menores a 13,5 m es posible encontrar valores

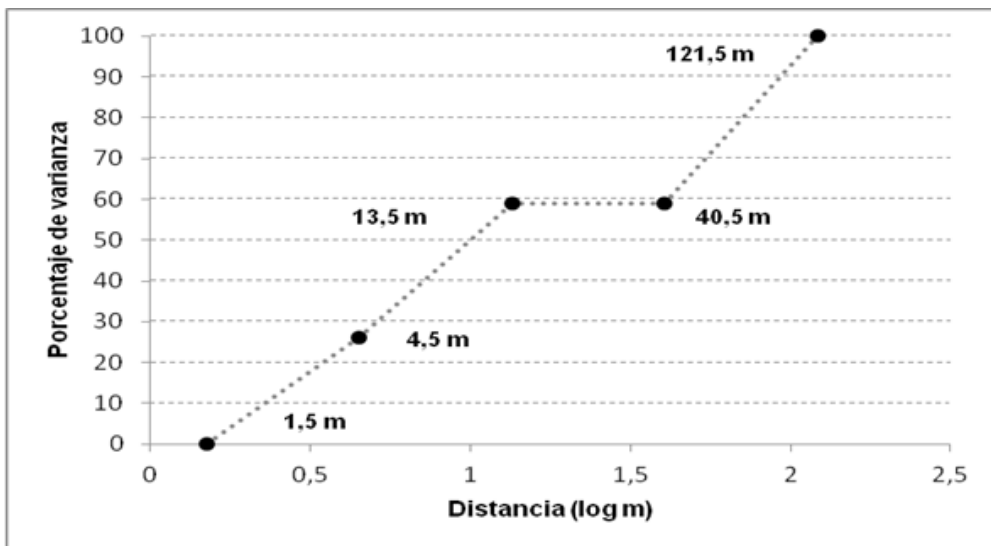


Fig. 2. Aproximación al variograma a través de un diseño espacial anidado optimizado en un sitio de suelo Andisol de la precordillera de Ñuble, Chile.

Fig. 2. Approach to the variogram from an optimized nested spatial design at an Andisol soil site located in the pre-mountains of Ñuble region, Chile.

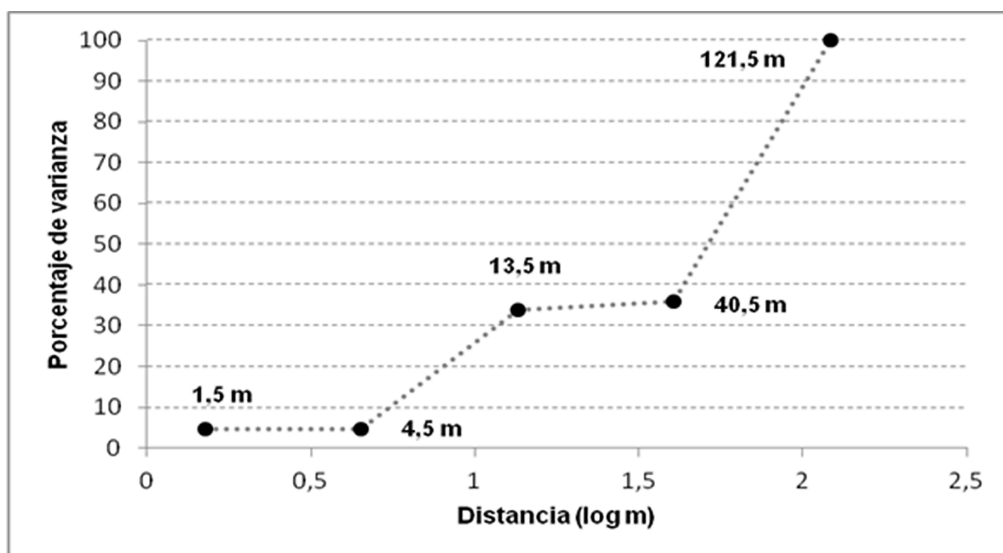


Fig. 3. Aproximación al variograma a través de un diseño espacial anidado optimizado en un sitio de suelo Inceptisol del valle de Colchagua, Chile.

Fig. 3. Approach to the variogram from an optimized nested spatial design at an Inceptisol soil site located in the valley of Colchagua region, Chile.

relativamente similares, o con diferencias poco significativas, lo que sugiere la presencia de un factor común predominante entre sí que relaciona su baja variabilidad. Algunas de las condiciones que afectan el óptimo desarrollo de la mineralización del N y que podrían explicar ese comportamiento, corresponden principalmente a parámetros ambientales como temperatura, humedad y aireación (Wang et al., 2006; Xu et al., 2007) ya que inciden directamente en la viabilidad y desarrollo de los microorganismos del suelo.

Según las características de ambos sitios experimentales (Tabla 1) los cultivos establecidos tenían la particularidad de demandar alta cantidad de agua, requerimiento que sin problemas era cubierto por el riego directo y las precipitaciones de la zona. Sin embargo, el aspecto más importante ocurre a nivel de suelo, en la capacidad de retención de humedad y que deriva principalmente del tipo de suelo y textura. Es bien conocido que texturas arcillosas tienden a retener una mayor cantidad de humedad, y que a su vez contrariamente ocasionan una disminución en la aireación de suelo (Delin y Linden, 2002). Kruse et al. (2004) encontraron que bajo condiciones de humedad continua en un suelo, se mineralizó el 30% del N de una enmienda aplicada, mientras que condiciones de desecación y re-humedecimiento alternado, significaron una mínima mineralización, e incluso la inmovilización del N. Por otra parte, la temperatura de suelo influencia notablemente

la actividad de la biomasa microbiana, ya que aumentos de temperatura promueven su metabolismo y reproducción (Tejada et al., 2002). De esta manera, en un suelo existe la posibilidad de encontrar zonas o lugares específicos con diferentes resultados, influenciados en mayor o menor grado por los parámetros comentados anteriormente.

Comparación de la dependencia espacial entre sitios

La dependencia espacial de una variable puede ser categorizada según su grado, clasificándose como fuerte cuando el efecto pepita es < 25% de la varianza total, moderada cuando se encuentra entre un 25–75%, o débil cuando su valor es > 75% (Cambardella et al., 1994). Al observar la gráfica, ambos sitios obtuvieron un efecto pepita menor al 25% de la varianza total, con la particularidad de encontrar efecto nulo en el sitio Andisol. Esto también ha sido observado para el suelo Andisol usando otro indicador de la mineralización (Córdova et al., 2018), e implica que en este estudio el error experimental de la cuantificación del PND fue bajo, y no interfiere en la cuantificación de la medición de la dependencia espacial.

También existió una diferencia marcada en el porcentaje de varianza total asociada a los intervalos de 13,5 y 40,5 m, mostrando ser un 24% menor en el sitio Inceptisol, con tan sólo un 35% versus el 59% alcanzado el sitio Andisol. Estos valores de efecto pepita y varianza total fueron

similares a los obtenidos por Ortega y Mardonez (2005) en diferentes períodos, para un suelo Andisol de similar ubicación geográfica. A su vez Qiu et al. (2015) lograron establecer el grado de dependencia espacial de diferentes indicadores de N, siendo particularmente moderado para el N mineralizado anaeróbicamente con un 50% de la varianza total.

Es importante destacar que los valores obtenidos son sitio específicos de una sola temporada, y que por lo tanto sólo sirven de referencia ante suelos de sitios de semejantes características. Se logró establecer a nivel general que la determinación de la dependencia espacial en un suelo permitiría optimizar la técnica de muestreo a utilizar, al establecer un intervalo de distancia que asegura la medición de la variabilidad en el espacio de la mineralización de N. Esto mejoraría el uso de fertilizantes, al cuantificar valores más representativos de la actividad del N en el suelo y no encubiertos bajo un promedio. En el caso del sitio Andisol e Inceptisol el límite de dependencia espacial más conveniente a utilizar para una interpolación espacial, correspondería al intervalo de 40 m, pero Webster et al. (2006) sugieren realizar el muestreo a la mitad de la distancia obtenida como dependencia espacial, es decir a 20 m de distancia. Ello generaría 25 puntos de muestreo ha^{-1} , lo que está dentro del rango establecido por Ortega y Mardonez (2005) para un suelo volcánico con intensidades de 5 a 35 puntos ha^{-1} .

Pese a lo contrastante de las características de cada sitio estudiado, los resultados mostraron que aunque los contenidos potenciales netos de mineralización de N fueron más altos en el sitio de suelo Andisol (Tabla 2), la dependencia espacial del PND mostró variar a la misma escala en ambos sitios. Sin embargo esto no significa que esta condición constituya una regla, ya que la variabilidad espacial de las propiedades de suelo son particulares a cada sitio de manejo. En los casos estudiados en esta investigación, la varianza total cuantificada en el sitio de suelo Inceptisol fue baja, por lo que se recomienda ajustar las escalas de variación a aplicar, y repetir la medición en primavera para contrastar el efecto de la humedad y temperatura sobre la actividad mineralizadora de los microorganismos

CONCLUSIONES

El proceso de mineralización de N medido a través de PND mostró ser variable en los sitios de estudio con suelo Andisol e Inceptisol, registrando una alta varianza, amplios rangos de los valores cuantificados y altos coeficientes de variación.

El estudio de la dependencia espacial del PND para los suelos Andisol e Inceptisol mostró que las distancias estudiadas fueron más efectivas cuantificando la variabilidad del PND en el sitio Andisol con un 59% de la varianza total, contra solo un 35% en el sitio Inceptisol. Estos resultados sugieren en ambos sitios de estudio utilizar intervalos de distancia de 20 m para la cuantificación espacial del nitrógeno disponible.

AGRADECIMIENTOS

Esta investigación fue financiada por el proyecto Conicyt-Fondecyt 11130447.

LITERATURA CITADA

- Álvarez, R., and H.S. Steinbach. 2011. Modelling apparent nitrogen mineralization under field conditions using regressions and artificial neural networks. *Agron. J.* 103(4):1159-1168.
- Antal, T., H. Mattila, M. Hakala-Yatkin, T. Tyystjärvi, and E. Tyystjärvi. 2010. Acclimation of photosynthesis to nitrogen deficiency in *Phaseolus vulgaris*. *Planta* 232(4):887-898.
- Baxter, S.J., M.A. Oliver, and J. Gaunt. 2003. A geostatistical analysis of the spatial variation of soil mineral nitrogen and potentially available nitrogen within an arable field. *Precis. Agric.* 4(2):213-226.
- Benintende, M.C., J.J. De Battista, S.M. Benintende, M.F. Saluzzio, C. Muller, y M.A. Sterren. 2008. Estimación del aporte de nitrógeno del suelo para la fertilización racional de cultivos. *Cienc. Docencia Tecnol.* 19(37):141-147.
- Cambardella, C.A., T.B. Moorman, J.M. Novak, T.B. Parkin, D.L. Karlen, R.F. Turco, et al. 1994. Field-scale variability of soil properties in central Iowa soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 58(5):1501-1511.
- Clivot, H., B. Mary, M. Valé, J.P. Cohan, L. Champolivier, F. Piroux, et al. 2017. Quantifying in situ and modelling net nitrogen mineralization from soil organic matter in arable cropping systems. *Soil Biol. and Bioch.* 111:44-59.
- Córdova C., S.P. Sohi, R.M. Lark, K.W. Goulding, and S. Robinson. 2012. Resolving the spatial variability of soil N using fractions of soil organic matter. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 174:66-72
- Córdova, C., R.M. Lark, S.P. Sohi, and K.W. Goulding. 2016. Distinct spatial dependency of carbon distribution between soil pools in grassland soil. *Chilean Journal of Agricultural & Animal Sciences* 32(S1):23-36.

- Córdova, C., J.A. Barrera, and C. Magna. 2018. Nitrogen mineralization as a guide for the spatially variable application of nitrogen in cereal crops. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 110:83-88.
- Corstanje, R., S. Grunwald, and R.M. Lark. 2008. Inferences from fluctuations in the local variogram about the assumption of stationarity in the variance. *Geoderma* 143(1-2):123-132.
- Delin, S., and B. Lindén. 2002. Relations between net nitrogen mineralization and soil characteristics within an arable field. *Acta Agric. Scand. Sect. B Soil Plant Sci.* 52(2):78-85.
- FAO. 2015. World fertilizer trends and outlook to 2018. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), Rome, Italy.
- Genovese, M.F., H.E. Echeverría, G.A. Studdert, y H. Sainz. 2009. Nitrógeno de amino-azúcares en suelos: calibración y relación con el nitrógeno incubado anaeróbico. *Cienc. Suelo* 27(2):225-236.
- Guo, J.H., X.J. Liu, Y. Zhang, J.L. Shen, W.X. Han, W.F. Zhang, et al. 2010. Significant acidification in major Chinese croplands. *Science* 327(5968):1008-1010.
- Keeney, D.R., and J.M. Bremner. 1966. Comparison and evaluation of laboratory methods of obtaining an index of soil nitrogen availability. *Agron. J.* 58(5):498-503.
- Knicker, H. 2011. Soil organic N - an under-rated player for C sequestration in soils? *Soil Biol. Biochem.* 43(6):1118-1129.
- Kruse, J.S., D.E. Kissel, and M.L. Cabrera. 2004. Effects of drying and rewetting on carbon and nitrogen mineralization in soils and incorporated residues. *Nutr. Cycl. Agroecosyst.* 69(3):247-256.
- Lark, R.M. 2011. Spatially nested sampling schemes for spatial variance components: scope for optimization. *Comput. Geosci.* 37(10):1633-1641.
- St. Luce, M., J.K. Whalen, N. Ziadi, and B.J. Zebarth. 2011. Nitrogen Dynamics and Indices to Predict Soil Nitrogen Supply in Humid Temperate Soils. Chapter 2. Donald L. Sparks (ed.). *Advances in Agronomy*, Academic Press 112:55-102.
- Lu, C., H. Chen, Z. Teng, L. Yuan, J. Ma, H. He, et al. 2018. Effects of N fertilization and maize straw on the dynamics of soil organic N and amino acid N derived from fertilizer N as indicated by ¹⁵N labelling. *Geoderma* 321:118-126.
- Nemergut, D.R., A.R. Townsend, S.R. Sattin, K.R. Freeman, N. Fierer, J.C. Neff, et al. 2008. The effects of chronic nitrogen fertilization on alpine tundra soil microbial communities: implications for carbon and nitrogen cycling. *Environ. Microbiol.* 10(11):3093-3105.
- Ortega, R., y R. Mardonez. 2005. Variabilidad espacial de la mineralización de nitrógeno en un suelo volcánico de la Provincia de Ñuble, VIII Región, Chile. *Agric. Téc. (Chile)* 65(2):221-231.
- Qiu, W., P. Johnstone, D. Wallace, N. Arnold, B. Searle, J. Sharp, et al. 2015. Spatial variability of nitrogen supply assessed using soil and plant bioassays [en línea]. ResearchGate, Germany. a<https://www.researchgate.net/publication/299612579_SPATISP_VARIABILITY_OF_NITROGEN_SUPPLY_ASSESSED_USING_SOILS_AND_PLANT_BIOASSAYS>. [Accessed 26 September 2017].
- Ramirez, K.S., C.L. Lauber, R. Knight, M.A. Bradfords and N. Fierer. 2010. Consistent effects of nitrogen fertilization on soil bacterial communities in contrasting systems. *Ecology* 91(12):3463-3470.
- Robertson, G.P., and P.M. Vitousek. 2009. Nitrogen in agriculture: balancing the cost of an essential resource. *Annu. Rev. Environ. Resour.* 34:97-125.
- Robertson, G.P., and P.M. Groffman. 2015. Nitrogen transformations. p. 421-446. In E.A. Paul (ed.). *Soil microbiology, ecology, and biochemistry*. (4th. ed.). Academic Press, London, UK.
- Rojas, C. 1992. Estimación del N-disponible y N-orgánico en suelos chilenos. *Agri. Téc. (Chile)* 52(4):398-402.
- Ros G.H., M.C. Hanegraaf, E. Hoffland, and W.H. van Riemsdijk. 2011. Predicting soil N mineralization: Relevance of organic matter fractions and soil properties. *Soil Biology and Biochemistry* 43:1714-1722.
- Sanfuentes, J., y J.A. Rodríguez. 1993. La fertilización de los cultivos: un método racional. Pontificia Universidad Católica de Chile, Facultad de Agronomía, Santiago, Chile.
- Studdert, G.A., y H.E. Echeverría. 2006. Relación entre el cultivo antecesor y la disponibilidad de nitrógeno para el trigo en la rotación. *Cienc. Suelo* 24(1):89-96.
- Tejada, M., C. Benitez, and J.L. Gonzalez. 2002. Nitrogen mineralization in soil with conventional and organomineral fertilization practices. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 33(19-20):3679-3702.

- Urakawa, R., H. Shibata, M. Kuroiwa, Y. Inagaki, R. Tateno, T. Hishi, et al. 2014. Effects of freeze-thaw cycles resulting from winter climate change on soil nitrogen cycling in temperate forest ecosystems throughout the Japanese archipelago. *Soil Biol. Biochem.* 74:82–94.
- VSN International. 2019. *Genstat for Windows*. 20th ed. VSN International, Hemel Hempstead, UK. Available at Genstat.co.uk (Accessed 11 December, 2019)
- Wang, C., S. Wan, X. Xing, L. Zhang, and X. Han. 2006. Temperature and soil moisture interactively affected soil net N mineralization in temperate grassland in northern China. *Soil Biol. Biochem.* 38(5):1101–1110.
- Waring, S.A., and J.M. Bremner. 1964. Ammonium production in soil under waterlogged conditions as an index of nitrogen availability. *Nature* 201(4922):951–952.
- Webster R., S.J. Welham, J.M. Potts, and M.A. Oliver. 2006. Estimating the spatial scales of regionalized variables by nested sampling, hierarchical analysis of variance and residual maximum likelihood. *Comput. Geosci.* 32(9):1320–1333.
- Webster, R., and R.M. Lark. 2013. *Field sampling for environmental science and management*. Routledge, Milton Park, UK.
- Xiong, X., S. Grunwald, R. Corstanje, C. Yu, and N. Bliznyuk. 2016. Scale-dependent variability of soil organic carbon coupled to land use and land cover. *Soil and Tillage Research* 160:101–109.
- Xu, Y., L. Li, Q. Wang, Q. Chen, and W. Cheng. 2007. The pattern between nitrogen mineralization and grazing intensities in an Inner Mongolian typical steppe. *Plant Soil* 300(1-2):289–300.
- Zebarth, B.J., C.F. Drury, N. Tremblay, and A.N. Cambouris. 2009. Opportunities for improved fertilizer nitrogen management in production of arable crops in Eastern Canada: a review. *Can. J. Soil Sci.* 89(2):113–132.
- Zhang, X., E.A. Davidson, D.L. Mauzerall, T.D. Searchinger, P. Dumas, and Y. Shen. 2015. Managing nitrogen for sustainable development. *Nature* 528:51–59.