



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

**FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLÁN**

---

---

**ANÁLISIS GEOESPACIAL PARA DETERMINAR LA  
DOSIS ÓPTIMA DE FERTILIZACIÓN EN MAÍZ EN  
EL MUNICIPIO DE AHUAZOTEPEC, PUEBLA**

**TESIS**

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:**

**INGENIERO AGRÍCOLA**

**P R E S E N T A:**

**NESTOR ANGEL GARCÍA VILLARREAL**

**ASESORA: DRA. MARTHA ELENA DOMÍNGUEZ HERNÁNDEZ**

**COASESORA: Q. CELIA ELENA VALENCIA ISLAS**

**CUAUTITLÁN IZCALLI, ESTADO DE MÉXICO 2018**



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



## Contenido

1. ÍNDICE DE TABLAS Y FIGURAS.....	iii
2. RESUMEN.....	1
3. INTRODUCCIÓN.....	3
3.1. Objetivos.....	4
4. MARCO CONCEPTUAL.....	5
4.1. Sistema de Producción Maíz.....	5
4.1.1. Generalidades del cultivo.....	5
4.1.2. Importancia económica de la producción de maíz.....	5
4.1.3. Manejo agronómico.....	7
4.2. Suelo.....	8
4.2.1. Propiedades físicas del suelo.....	8
4.2.2. Propiedades químicas del suelo.....	10
4.3. Agricultura de Precisión.....	12
4.3.1. Manejo sitio específico.....	13
4.3.2. Mapas de variabilidad del suelo.....	14
4.3.3. Geoestadística.....	14
4.3.4. Semivariogramas.....	15
4.3.5. Kriging.....	16
5. METODOLOGÍA.....	18
5.1. Contexto Físico.....	18
5.1.1. Ubicación geográfica.....	18
5.1.2. Características edáficas y climáticas.....	19

5.2.	Trabajo de campo.....	20
5.2.1.	Muestreo .....	20
5.3.	Trabajo de Laboratorio .....	20
5.4.	Trabajo de Gabinete.....	22
5.4.1.	Procesamiento geoestadístico de los resultados de laboratorio .....	22
5.4.2.	Generación de mapas de variabilidad.....	22
6.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	31
6.1.	Valores Estadísticos de las Propiedades Físicas y Químicas del Suelo.....	31
6.2.	Mapas de Variabilidad .....	32
6.3.	Propuesta de Fertilización con Manejo Sitio-específico.....	40
6.3.1.	Propuesta de fertilización 1 .....	40
6.3.2.	Propuesta de fertilización 2 .....	44
6.3.3.	Fertilización convencional.....	48
7.	CONCLUSIONES.....	49
8.	REFERENCIAS .....	51

# 1. ÍNDICE DE TABLAS Y FIGURAS

Tabla 1. Características Climáticas, Fisiográficas. Hidrológicas y Edáficas del Municipio de Ahuazotepec, Puebla. ....	19
Tabla 2. Medidas de tendencia central y dispersión de los parámetros físicos del suelo. ....	31
Tabla 3. Medidas de tendencia central y dispersión de los parámetros químicos del suelo.	32
Tabla 4. Demanda nutritiva de maíz para un rendimiento de $9.4 \text{ t ha}^{-1}$ .....	40
Tabla 5. Cantidad requerida de Triple 17 para satisfacer la demanda del cultivo.....	41
Tabla 6. Cantidad requerida de nitrato de potasio para satisfacer la demanda del cultivo...	42
Tabla 7. Cantidad requerida de urea para satisfacer la demanda del cultivo.....	43
Tabla 8. Requerimiento de nitrato de potasio 2.....	45
Tabla 9. Requerimiento de MAP.....	46
Tabla 10. Requerimiento de urea 2.....	47
Figura 1. Producción mundial de maíz por país.. ....	6
Figura 2. Estructura de un semivariograma típico (Johnston, Ver Hoef, Krivaruchko, & Lucas, 2001). ....	16
Figura 3. Ubicación del Municipio de Ahuazotepec, Puebla. ....	18
Figura 4. Parcela muestreada Google Maps (2017).. ....	19
Figura 5. Inserción de base de datos Excel en ArcMAP.. ....	22
Figura 6. Conversión de datos a plano cartesiano XY.. ....	23
Figura 7. Coordenadas UTM para Méxic.....	23
Figura 8. Puntos de muestreo georreferenciados.....	24
Figura 9. Proceso para exportar a shapefile.....	24

Figura 10. Shapefile de los puntos de muestreo..	25
Figura 11. Proceso del Kriging.....	26
Figura 12. Capa de % de arena.....	26
Figura 13. Guardar capa como archivo de capa..	27
Figura 14. Exportar capa como shapefile..	27
Figura 15. Selección de la herramienta de construcción..	28
Figura 16. Selección del shapefile a recortar.....	28
Figura 17. Recorte del shapefile.....	29
Figura 18. Mapa de variabilidad recortado al contorno de la parcela..	29
Figura 19. Distribución espacial del Nitrógeno amoniacal..	34
Figura 20. Distribución espacial del Nitrógeno nítrico..	35
Figura 21. Distribución espacial del nitrógeno disponible.....	36
Figura 22. Distribución espacial del Fósforo asimilable.....	37
Figura 23. Distribución espacial del Potasio asimilable.....	38
Figura 24. Distribución espacial de la materia orgánica..	39

## **2. RESUMEN**

El maíz es el cultivo de mayor importancia económica en México y a nivel mundial; esto es debido a que puede usarse como alimento humano, alimento animal y también tiene diversos usos industriales. La demanda de maíz es creciente en los últimos años, por lo que la producción mundial de este cultivo ha aumentado. Estados Unidos y China son los mayores productores mundiales de maíz; México se encuentra en el 5° lugar. En los últimos años, México ha tenido que importar maíz de otros países debido a que la producción nacional es insuficiente; los bajos rendimientos de maíz por hectárea son la principal constante que se observa por los campos de cultivo del país, siendo este un factor de gran importancia que se busca revertir a partir de la implementación de diversas técnicas que tienen como objetivo incrementar el rendimiento por unidad de superficie.

El conocimiento de las características físicas y químicas de un suelo permiten realizar un manejo más preciso y adecuado de la fertilización, ya que se pueden tomar en cuenta, tanto las características del mismo como la demanda nutrimental del cultivo. Con el uso de las herramientas geoestadísticas y los mapas de variabilidad es posible conocer la condición de un suelo en sus distintas propiedades. Los mapas de variabilidad pueden usarse para determinar dosis de fertilización óptimas, esto quiere decir que, se hace más eficiente el uso de insumos, es posible reducir los costos de fertilización y tener un manejo más sustentable de los recursos para la producción.

El presente trabajo tuvo como objetivo evaluar la variabilidad espacial de las propiedades físicas y químicas de un suelo con vocación agrícola, con el fin de establecer un programa de fertilización específica para el cultivo de maíz en el municipio de Ahuazotepec, Puebla. Las propiedades físicas y químicas del suelo se obtuvieron mediante análisis de laboratorio, los cuales se llevaron a cabo en el Laboratorio de Investigación de Suelos L-211 de la carrera de Ingeniería Agrícola. Los datos experimentales obtenidos fueron procesados estadísticamente con medidas de tendencia central y dispersión con el fin de conocer el comportamiento de las variables estudiadas. Utilizando el software ArcGIS, los datos de las propiedades físicas y químicas del suelo, se analizaron geoespacialmente para obtener los mapas de variabilidad de cada propiedad; estos mapas permitieron la identificar las

características diferenciales del terreno y determinar dosis de fertilización que permiten aportar únicamente el déficit que presenta cada nutriente en el suelo para satisfacer la demanda del cultivo y minimizar la pérdida de nutrientes. Se proponen tres dosis de fertilización que permitirán que el productor seleccione la más adecuada de acuerdo con la disposición de las fuentes en la región y del capital destinado a la producción.

### 3. INTRODUCCIÓN

Las variaciones que se producen en el desarrollo de un cultivo y su rendimiento son causadas por las condiciones ecológicas específicas de cada sitio, por los factores genéticos de la especie vegetal, y por las condiciones de manejo y culturales, (Leiva, 2006). Así mismo, la variabilidad de las propiedades físicas y químicas del suelo influye en gran medida en la producción de los cultivos (Rodrigues, González, Leiva, & Guerrero, 2008).

Las propiedades físicas y químicas del suelo se presentan de forma heterogénea en los campos de cultivo, esta variabilidad se produce de manera natural debido a los procesos de formación del suelo (Goovaerts, 1998) y por las características específicas del terreno. La variabilidad es mayor en las propiedades químicas que la que ocurre en las propiedades físicas del suelo; además se incrementa en suelos que han sido trabajados con fines agrícolas (Obando, Villegas, Betancurt, & Echeverri, 2006). Las propiedades que sufren más cambios son las afectadas directamente por el manejo agronómico convencional; principalmente la fertilización y el riego (Paz-González, Viera, & Taboada, 2000).

La agricultura de precisión tiene como base el conocimiento de la variabilidad espacial de del suelo y su relación con la producción; el conocimiento de estos factores facilita el establecimiento de sistemas de producción con más eficientes y sostenibles (Valbuena, Martínez, & Giraldo, 2008). Las herramientas que proporciona la Geoestadística, permiten elaborar mapas que ayudan a analizar cuantitativamente las condiciones de variabilidad espacial de las propiedades del suelo (Silva, de Assis Júnior, Rocha, & Camacho, 2011)

En el presente trabajo se evalúa la variabilidad espacial de un suelo de vocación agrícola, mediante la Geoestadística y los sistemas de información geográfica con el fin de generar datos y mapas que servirán para interpretar las condiciones físicas y químicas de este. Los datos obtenidos servirán como acervo histórico de las condiciones del suelo y también serán una herramienta para la planificación del aprovechamiento con el fin de incrementar la productividad y hacer más eficiente el uso de los recursos destinados a la producción.

### **3.1. Objetivos**

#### **General**

- Determinar, a partir de la variabilidad espacial de propiedades físicas y químicas del suelo, distintas dosis de fertilización para el cultivo de maíz con el fin de seleccionar la óptima para las condiciones de la región de estudio.

#### **Específicos**

- Determinar, mediante el análisis de laboratorio, las propiedades físicas y químicas de un suelo de la región de Ahuazotepec, Puebla.
- Analizar Geoestadísticamente las propiedades físicas y químicas del suelo para determinar su variabilidad espacial.
- Generar mapas de variabilidad espacial de las propiedades físicas y químicas del suelo para determinar las condiciones específicas de la parcela.

## **4. MARCO CONCEPTUAL**

### **4.1. Sistema de Producción Maíz**

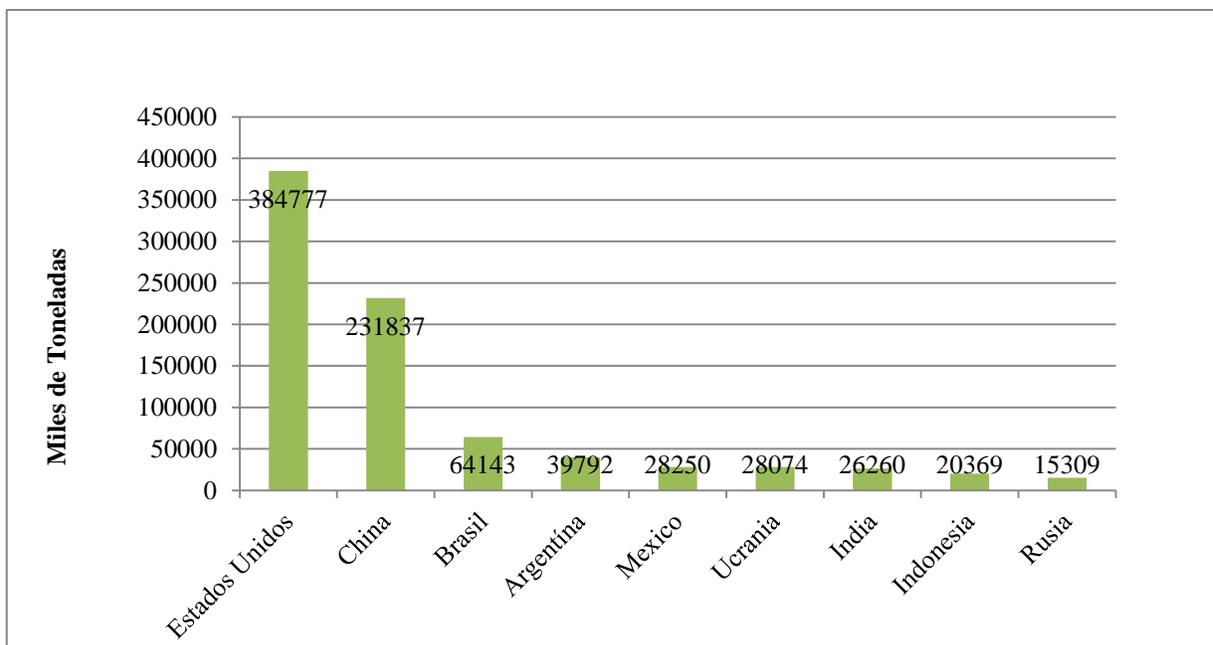
#### **4.1.1. Generalidades del cultivo**

México, es considerado como centro de origen y domesticación del maíz (*Zea mays* L.), así como uno de los centros de diversidad más importantes (Matsuko et al., 2002). El maíz surgió aproximadamente entre los años 8000 y 600 AC. Existen evidencias moleculares que muestran al teocintle como ancestro directo del maíz, este proceso de domesticación se realizó a través de la selección, dando por resultado una especie totalmente diferente y dependiente del humano al eliminar características físicas de supervivencia, sin embargo hoy día existe una gran cantidad de razas y variedades que se adaptan a los más diversos ambientes ecológicos (Acosta, 2009).

El maíz, es el segundo cultivo con mayor producción en el mundo; junto con el arroz y el trigo, su importancia económica y social a nivel mundial radica en su uso como alimento humano, como alimento para el ganado o como fuente de un gran número de productos industriales (SAGARPA, 2015b).

#### **4.1.2. Importancia económica de la producción de maíz**

La producción mundial de maíz en el año 2016 fue de mil 60 millones 107 mil 470 toneladas ó Megagramos (Mg), los principales productores de maíz en el mundo fueron Estados Unidos, China y Brasil (Figura 1); con 384 millones 777 mil 890, 231 millones 837 mil 497 y 64 millones 143 mil 414 Mg respectivamente; México ocupa el quinto lugar con 28 millones 250 mil 783 Mg (FAO, 2017a).



**Figura 1.** Producción mundial de maíz por país. Elaboración propia con datos de (FAO, 2017a).

El consumo mundial de maíz tiene una tendencia creciente debido tanto al consumo forrajero, como al consumo humano e industrial. Entre los ciclos 2005/2006 y 2015/2016 el consumo total de granos ha crecido a una tasa media anual de 3.3 %. México, junto con Estados Unidos, China y la Unión Europea, se encuentra dentro de los ocho países que concentran el 75.5 % del consumo total mundial de maíz (FIRA, 2016).

La SAGARPA, a través del Sistema de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP) reporta que, en el año 2017 la superficie nacional sembrada de maíz para grano fue de 7 millones 540 mil 942.12 ha, de las cuales se cosecharon 7 millones 327 mil 501.43 ha; con un rendimiento promedio de 3.79 Mg ha<sup>-1</sup>, la producción fue de 27 millones 762 mil 480.9 Mg. El valor de producción se estimó en 100 mil 206 millones 306 mil 150 pesos (SIAP, 2018).

En el año 2015 México importó 12 millones 350 mil Mg de maíz; en contraste, las exportaciones de maíz de México fueron de 730 mil Mg, lo cual creó un déficit en la balanza comercial de 11 millones 600 mil Mg. Estados Unidos es el principal proveedor de maíz grano para México, durante el año 2015 las importaciones provenientes de dicho país

fueron de 11 millones 792 mil Mg, con un valor de 2 mil 319 millones de dólares (FIRA, 2016).

En México, la producción de maíz se realiza en todo el territorio; sin embargo, diez estados concentran aproximadamente el 80 % de la producción nacional: Sinaloa, Jalisco, Estado de México, Puebla, Michoacán, Chihuahua, Guanajuato, Veracruz, Chiapas y Tamaulipas. El SIAP reporta, para el año 2017, que en el estado de Puebla se sembraron 525 mil 108 ha de maíz grano, con un rendimiento promedio de 2.0 Mg ha<sup>-1</sup>, la producción total fue de 1 millón 027 mil 725 Mg, con un valor de producción de 3 mil 826 millones 283 mil pesos. En el municipio de Ahuazotepec, Puebla, la superficie sembrada de maíz grano fue de 2 mil 360 ha, con un rendimiento promedio de 2.13 Mg ha<sup>-1</sup>, la producción fue de 4 mil 430 Mg de grano, con un valor de 22 millones 229 mil pesos (SIAP, 2018).

#### **4.1.3. Manejo agronómico**

En el estado de Puebla, el maíz se produce generalmente en el ciclo agrícola primavera-verano, la fecha de siembra es entre el 15 de marzo y el 15 de abril, con una densidad de plantación de 60 mil a 70 mil plantas por hectárea, requiriendo una cantidad de 22 a 25 kg de semilla, se utilizan variedades criollas y mejoradas. En las zonas con disponibilidad de riego, se proporciona un riego inicial 5 ó 10 días antes de la siembra y un riego de auxilio en mayo o junio y otro a fines de julio (SAGARPA, 2015a)

Las plagas de ocurrencia son gallina ciega y el gusano de alambre, los cuales se controlan aplicando 12 kg de Carbofurán o 20 kg por ha de Terbufos al momento de la siembra y araña roja que se controla con la aplicación de 0.5 L de Propargrita 1-1.5 disuelto en 200 litros de agua por ha.

La fertilización recomendada para Valles Altos bajo condiciones de temporal favorable es 140N-60P-30K con una densidad de siembra de 60 mil plantas por ha (Arellano, Virgen, & Avila, 2010)

La cosecha se lleva a cabo los últimos días de octubre, una vez que las plantas alcanzan la madurez fisiológica, se siegan y se amontonan para el secado del grano. Una vez transcurridos 30 días aproximadamente se efectúa la pizca de las mazorcas (SAGARPA, 2015a).

## **4.2. Suelo**

El suelo ha sido ampliamente estudiado por la comunidad científica de las últimas décadas y por consiguiente definido por diversos autores e instituciones dedicadas a su estudio, Porta, López-Acevedo, & M. Poch, (2014) definieron al suelo como una cubierta delgada en la superficie terrestre que varía de unos centímetros a varios metros de profundidad, además el suelo constituye una interface que permite intercambios entre la litosfera, la biosfera y la atmósfera. Además, la FAO,( 2015) reconoce al suelo como un recurso finito, dado que su pérdida y degradación es irreversible, además de ser la base para la producción de alimentos humano y para el ganado, brinda diversos servicios ecosistémicos esenciales para el planeta.

Para el desarrollo de cultivos, es importante definir al suelo como un material de consistencia heterogénea con tres fases, una líquida, una sólida y una fase gaseosa; las tres influyen en el suministro de nutrientes a la raíz de la planta, pero únicamente, la fase sólida es el reservorio de nutrientes; mientras que, la fase líquida y la sólida comprenden la solución del suelo, la cual facilita el transporte de nutrientes a la raíz de la planta (Mengel, Kirby, Kosegarten, & Appel, 2001).

### **4.2.1. Propiedades físicas del suelo**

#### ***Color***

El color es compuesto por tres variables medibles: Hue, Value y Chroma. De acuerdo con Boul, Southard, Graham, & McDaniel (2003) Hue es el color dominante espectral pues está relacionado con la longitud de onda de la luz. Value es una medida del grado de oscuridad o luminosidad del color, está relacionada con la cantidad de luz que refleja. Chroma es una medida de pureza o fuerza del color espectral.

El color de un suelo está fuertemente relacionado con los componentes sólidos del mismo, Schulze, (1993) obtuvo una relación inversa entre el value del color y el contenido de materia orgánica de los horizontes superiores del suelo, también menciona que la fracción orgánica que más influye sobre el color oscuro del suelo es la de los ácidos húmicos.

#### ***Textura***

La textura es definida por la Soil Science Society of America (2008) como las proporciones relativas de los diferentes apartados en el material del suelo. Específicamente, Lacasta, Meco, & Mair, (2005), mencionan que la textura de un suelo indica el contenido de partículas de arena, limos y arcilla en el suelo, la distribución del tamaño de las partículas determinan el grosor o finura del suelo; así mismo, influye en otras propiedades como la porosidad y la densidad aparente; por lo tanto, interviene en el almacenamiento y movimiento de agua y aire.

### ***Densidad***

Según la FAO (2017b) la densidad de un suelo se refiere al peso del mismo por volumen de peso del suelo, existen dos tipos de densidad, real y aparente. Casas (2011) define la densidad real ( $\rho_s$ ) como la densidad media de la fase sólida del suelo, se calcula por la relación entre la masa de la fase sólida del suelo y volumen que ocupa. La densidad aparente ( $\rho_b$ ) es la masa por unidad de volumen de muestra en condiciones de campo, y en ella se tiene en cuenta el volumen de poros en el suelo. Tal como se había mencionado anteriormente, la densidad está relacionada con la capacidad de almacenamiento de agua y aire en el suelo (Lacasta et al., 2005).

### ***Porosidad***

Se refiere al porcentaje del volumen del suelo que no es ocupado por partículas sólidas. El espacio poroso del suelo se puede dividir en macroporos que son responsables del drenaje, aireación del suelo y constituyen el espacio donde se desarrollan las raíces de la planta, en el espacio poroso también existen los microporos, en los cuales agua y nutrientes son retenidos por las partículas del suelo (FAO, 2017b). La porosidad del suelo es un factor que influye en los procesos de infiltración y escurrimiento de agua, así como en el transporte de agua en el suelo y en la erosión hídrica (Horowitz & Walling, 2005).

### ***Profundidad efectiva***

Se define como la distancia vertical hasta donde puedan penetrar las raíces; en los suelos pueden encontrarse barreras que impiden el crecimiento del sistema radical, como los son capas duras, agua subterránea, capas reducidas, toxicidad de aluminio. El sistema radical de

los cultivos es variable, algunos llegan a ser superficiales mientras que otras pueden ser de varios metros de profundidad; es por ello la importancia de conocer la profundidad del suelo y la distancia de las raíz del cultivo (Arias, 2007).

#### **4.2.2. Propiedades químicas del suelo**

##### ***pH***

El pH del suelo es una medida de la acidez o alcalinidad en los suelos; es definido como el logaritmo negativo (base10) de la actividad de iones hidronio ( $H^+$ ) en la solución suelo; el rango normal se encuentra entre 1 -14, teniendo al valor 7 como neutro; un pH por debajo de 7 se considera ácido, así mismo un pH por arriba de 7 se considera alcalino. El pH del suelo se considera una variable maestra en los suelos pues controla muchos procesos que se llevan a cabo en él, en específico, la disponibilidad de los nutrientes (Kazantzev, 2017). El pH del suelo influye en la disponibilidad de nutrientes y de la actividad microbiana; en suelos ácidos pocos nutrientes están disponibles para las raíces, factor que afecta la producción de los cultivos (FAO, 2013).

Existen diversas fuentes que acidifican al suelo, la fuente más común es por la presencia de los iones  $H^+$  y  $Al^{3+}$ , cuando existe presencia de estos iones y en conjunto con un pH entre 4 y 6, estos reaccionan con el agua ( $H_2O$ ) formando  $AlOH^{+2}$  y  $Al(OH)_2^+$ , liberando en tal proceso iones  $H^+$ ; otros factores que acidifican el suelo son el uso de fertilizantes, la actividad radical de las plantas, lluvia ácida, erosión de minerales y descomposición de la materia orgánica. Un suelo alcalino tiene altas saturaciones de sales de iones ( $K^+$ ,  $Ca^+$ ,  $Mg^+$  y  $Na^+$ ), se clasifican en suelos salinos, suelos sódicos, suelos salino-sódicos o suelos alcalinos; cuando un suelo tiene altas concentraciones de  $Ca^+$  y  $Mg^+$  se consideran suelos salinos, así mismo cuando contienen altas concentraciones de  $Na^+$  se denominan salinos sódicos (Kazantzev, 2017).

##### ***Nitrógeno***

Entre el 97 % y 99 % del nitrógeno presente en el suelo se encuentra como parte de la materia orgánica, con el paso del tiempo una pequeña porción es mineralizada en formas utilizables para las plantas como el nitrato y el amonio. El amonio ( $NH_4^+$ ) tiene una carga positiva con la cual es atraída por los coloides del suelo, de esta forma no se pierde por

lixiviación. El nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ) se mueve libremente en el suelo debido a su carga negativa que facilita la diseminación en la solución del suelo y el contacto con las raíces de la planta (Plaster, 1992).

El nitrógeno es un elemento esencial porque es un componente de las proteínas y cloroplastos; además, promueve el crecimiento vegetativo de tallos y hojas. La deficiencia de este nutriente se observa como clorosis en la planta (Plaster, 1992).

### ***Fósforo***

Los procesos de meteorización disuelven las rocas de la corteza para liberarlo; es el nutriente más limitante en la producción de cultivos, se presenta en forma inorgánica asociado a otros minerales y compuestos calcáreos, las formas orgánicas de fósforo incluyen fosfolípidos, ácidos fúlvicos y ácidos húmicos (Summer, 2000).

El fósforo tiene gran importancia en los procesos de la planta pues está relacionado con la transferencia, la captura y el transporte de energía en la fotosíntesis y en la absorción de nutrientes en la raíz (Plaster, 1992).

### ***Potasio***

El Potasio se encuentra en la corteza terrestre como feldespatos y micas principalmente; el desgaste de los feldespatos por largos periodos resulta en la disolución de los cristales y la liberación del ión  $\text{K}^+$  en la solución del suelo; este es adsorbido por los sitios de intercambio catiónico de las partículas del suelo (Foth, 1990).

El potasio es activador de enzimas necesarias para la formación de proteínas, celulosa, lignina y almidón, además le confiere rigidez al tallo, regula la apertura y cierre de los estomas, propiciando un buen intercambio gaseoso de la planta con la atmósfera (Plaster, 1992).

### ***Calcio y Magnesio***

El calcio proviene de la erosión de minerales y rocas de la corteza terrestre, incluidos feldespatos, apatitas, calizas y yeso (Plaster, 1992). El calcio se encuentra en el suelo como catión divalente  $\text{Ca}^{+2}$ , la menor presencia se puede encontrar en suelos muy lavados con

capacidades de intercambio catiónico bajas. El calcio es un componente fundamental para la creación de nuevas células al ser parte de la pared celular; la deficiencia de calcio en las plantas se expresa como plantas raquílicas, al producir menos células y de menor tamaño (Thompson & Troeh, 2004).

El magnesio se encuentra en algunos minerales primarios como el olivino, los piroxenos, entre otras. La forma como se encuentra en el suelo, al igual que el calcio, es como catión divalente  $Mg^{+2}$ , esta forma de magnesio puede ser fijado en arcillas, como también puede encontrarse en las fracciones orgánicas del suelo. El magnesio es un elemento altamente móvil dentro de la planta, es constituyente básico de la molécula de la clorofila, así como ser parte fundamental en el metabolismo de los carbohidratos (Kass, 1998).

#### ***Capacidad de intercambio catiónico***

Boul et al. (2003) la definen como la capacidad de un suelo para atraer e intercambiar iones positivamente cargados (cationes), es una reacción química reversible que se lleva a cabo dentro de la solución del suelo y es una característica importante para la fertilidad del suelo; La Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC) se expresa en centimoles por kilogramo (cmol/kg) (Foth, 1990). La importancia de la CIC radica en la capacidad de retención de cationes de importancia nutrimental para la planta ( $Ca^{+2}$ ,  $Mg^{+2}$ ,  $NH_4^+$ ,  $K^+$ ) y en el intercambio dentro de la solución del suelo por otros cationes o iones de hidrógeno que son liberados por la raíz del suelo de la planta (FAO, 2018).

### **4.3. Agricultura de Precisión**

Existen diversas definiciones de agricultura de precisión, una de las primeras fue dada en la segunda conferencia internacional del “Manejo del sitio específico para los sistemas agrícolas” llevada a cabo en Minneapolis en 1994; se definió como una información y tecnología basada en el sistema del manejo agrícola para identificar, analizar y manejar el sitio del suelo y su variabilidad temporal dentro de los terrenos de cultivo para así obtener una rentabilidad óptima, sostenible y protección del ambiente (Krishna, 2013). Otra definición se centra en la producción adecuada de cultivos, aplicando geotecnología para entender y gestionar eficazmente los flujos y ciclos dinámicos de los nutrientes entre un cultivo y el agroecosistemas (Farming & Components, 2010). La agricultura de precisión

casi siempre incluye el manejo de la variabilidad del terreno usando tecnologías de la información (SIG) y métodos de georreferenciación (Vrindts et al., 2003). De acuerdo con Kravchenko, (2003) la efectividad de la agricultura de precisión depende de la precisión del mapeo del suelo.

La base de la agricultura de precisión es el conocimiento de la variabilidad espacial de algunos factores de suelo y su relación con la producción, concepción fundamental para establecer sistemas de producción más sostenibles y eficientes (Valbuena et al., 2008). La agricultura de precisión considera la fertilidad del suelo y la demanda de nutrientes de los cultivos tan precisos como sea posible en el tiempo y en el espacio (Krishna, 2013).

Existen dos métodos usados dentro de la agricultura de precisión, el primero llamado “map-based” que involucra el muestro de puntos referenciados bajo un sistema de posicionamiento, el análisis de laboratorio del suelo muestreado, la generación de mapas de distribución de nutrientes y fertilidad del suelo o de mapas que representen las características físicas y químicas del suelo. El segundo método se llama “Sensor-based” el cual involucra el uso de sensores en tiempo real y la realimentación del sistema de control para que inmediatamente use el sistema estos datos y se apliquen apropiadamente los cambios pertinentes (Krishna, 2013).

#### **4.3.1. Manejo sitio específico**

El manejo sitio específico y la agricultura de precisión son usados comúnmente como sinónimos (Krishna, 2013). El manejo sitio específico en la aplicación de insumos agrícolas puede ser implementado dividiendo un lote en zonas de manejo más pequeñas que son más homogéneas en propiedades de interés. una zona de manejo se define como una parte de un campo que expresa una combinación homogénea de factores limitadores del rendimiento para los cuales es adecuado un índice único de un insumo específico para el cultivo (Doerge, 1998), (Ortega et al., 1999).

La utilización del método manejo sitio-especifico de nutrientes ha reducido la cantidad de fertilización nitrogenada en los campos de cultivo de maíz de la franja maicera de EUA. (Snyder, 1996) reportó que, el cultivo de maíz bajo el sistema de agricultura de precisión

requiere entre 3 y 13% menos fertilizante nitrogenado, produciendo rendimientos similares que con las prácticas convencionales.

#### **4.3.2. Mapas de variabilidad del suelo**

Los mapas de variabilidad ayudan a entender las diferencias espaciales en la distribución de las propiedades del suelo en una área determinada (Silva et al., 2011); son útiles para la investigación cuando es necesario conocer el efecto de diferentes variables sobre la producción (Acevedo et al., 2008).

En el ámbito experimental y de investigación existen una gran cantidad de autores que utilizan las herramientas de la geoestadística, en particular el uso de los mapas de variabilidad, para analizar la relación de los factores que componen al suelo y su comportamiento en el espacio y en el tiempo. (Silva, Gomes de Moura, & Camacho, 2010) determinaron la variabilidad espacial de infiltración de un suelo cultivado con maíz bajo un sistema agroforestal localizado en un municipio de Brasil; el suelo mostró una alta variabilidad en los factores de infiltración del suelo. Estos resultados permiten establecer parámetros de calidad de suelo directamente relacionados con la producción agrícola.

#### **4.3.3. Geoestadística**

La Geoestadística comprende un conjunto de herramientas que sirven para analizar y predecir valores de una variable que se encuentra distribuida en el espacio o en el tiempo de forma continua (Moral, 2004). Es una rama de la estadística con herramientas desarrolladas para describir patrones espaciales y predecir valores en lugares donde no se tomaron muestras; estas herramientas y métodos se han desarrollado de tal modo que ofrecen mecanismos para incorporar conjuntos de datos secundarios que complementan una variable primaria de interés, permitiendo así la construcción de modelos de interpolación más precisos (ESRI, 2017c).

La Geoestadística y sus herramientas son ampliamente utilizada en diversas áreas de la ciencia y la ingeniería (Martínez & Ramírez, 2005), en el estudio de la heterogeneidad espacial de las variables físicas y biológicas del ambiente (Moral, 2004), así como en el estudio de la variación espacial de la fertilidad de suelos (Henriquez, Killorn, Bertsch, & Sancho, 2005), por mencionar algunos.

#### 4.3.4. Semivariogramas

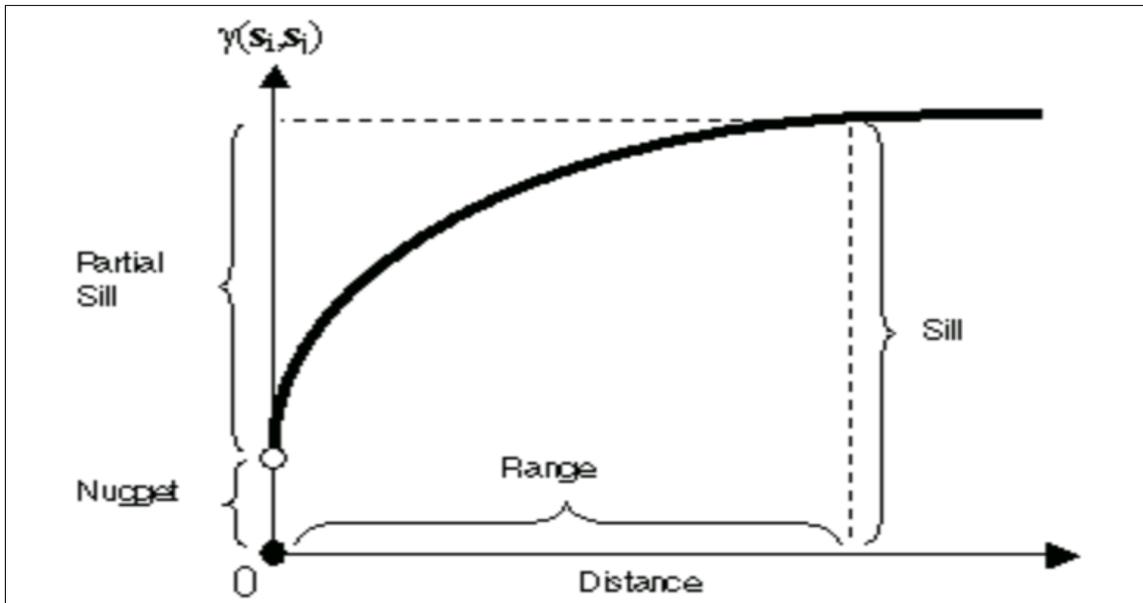
El semivariograma permite cuantificar la suposición de que las cosas que están más cercanas tienden a ser más similares que las cosas que están más distantes; junto con la covarianza miden la fuerza de la correlación estadística en función de la distancia (ESRI, 2017d). El semiovariograma es definido por la función:

$$\gamma(S_i, S_j) = \frac{1}{2} \text{var} (Z(S_i) - Z(S_j))$$

En donde “var” es la varianza; si dos lugares,  $S_i$  y  $S_j$ , están próximos entre sí en términos de distancia, se puede esperar que sean similares, por lo que la diferencia de sus valores,  $Z(S_i) - (S_j)$ , será pequeña; a medida que se separan sus valores se hacen menos similares por lo que la diferencia en sus valores,  $Z(S_i) - (S_j)$ , será mayor (ESRI, 2017d).

En la Figura 2 se muestra la estructura del semivariograma, en él se puede observar que la varianza de las diferencias incrementa con la distancia. Existen varios modelos de funciones, sin embargo, los parámetros de estos son comunes en su mayoría. La meseta o sill es el valor estable de  $\gamma$ , coincide con el valor de la varianza normal de esa variable. La meseta está compuesto por dos partes: el efecto nugget o efecto pepita, el cual es una discontinuidad en el origen; y el partial sill o meseta parcial. El alcance o range representa la distancia a partir de la cual el valor de  $\gamma$  se estabiliza, indica la influencia espacial de la autocorrelación en la variable (Moreno, 2008).

El efecto nugget es el resultado de errores en la medición o a fuentes espaciales de variación a distancias que son menores a los intervalos de muestreo, o a ambas situaciones. A una distancia de separación cero (intervalo = 0), el valor del semivariograma es 0; así mismo a una distancia de separación pequeña el semivariograma mostrará un efecto nugget, siendo un valor mayor a 0 (ESRI, 2017b).



**Figura 2.** Estructura de un semivariograma típico (Johnston, Ver Hoef, Krivaruchko, & Lucas, 2001).

El alcance o rango muestra que la variabilidad de un hecho geográfico no aumenta más al hacerlo la distancia de separación, por lo que los valores de ese hecho son independientes entre sí cuando están separados por esa distancia (Moreno, 2008).

La línea de ajuste representada en la Figura 2 tiene un comportamiento ascendente desde el 0 hasta la meseta, la pendiente de esta muestra el grado de continuidad espacial de la variable estudiada. A un valor de pendiente alto, la variable es poco continua, es decir, cambia rápidamente de valor en distancias reducidas; mientras que, si el valor de la pendiente es bajo, la variable cambia poco entre puntos que están poco separados, existiendo continuidad espacial (Bosque, 1997).

#### 4.3.5. Kriging

El Kriging es un procedimiento de interpolación que se basa en un análisis previo de la autocorrelación espacial de la variable; este procedimiento asume que la distancia o dirección entre los puntos muestrales refleja la correlación espacial y que ésta puede ser usada para explicar la variación en la superficie (Moreno, 2008). Esta herramienta ajusta una función matemática a una cantidad específica de puntos o a todos los puntos dentro de un radio específico para determinar el valor de salida para cada ubicación (ESRI, 2017a).

El método Kriging asume que el fenómeno estudiado toma valores en todas partes del área de estudio, aun si estos no fueron medidos, por lo cual maneja una continuidad espacial. El método funciona en dos etapas en la primera se cuantifica la estructura espacial de los datos, para cuantificar esta primera etapa se calcula el semivariograma empírico mediante el ajuste a los datos de un modelo de dependencia espacial; en la segunda etapa se realiza una predicción. Para realizar la predicción de un valor no muestral sobre un lugar específico se utilizará el modelo ajustado del semivariograma, la configuración espacial de los datos y los valores de los puntos muestrales que existen alrededor del lugar de predicción (Moreno, 2008).

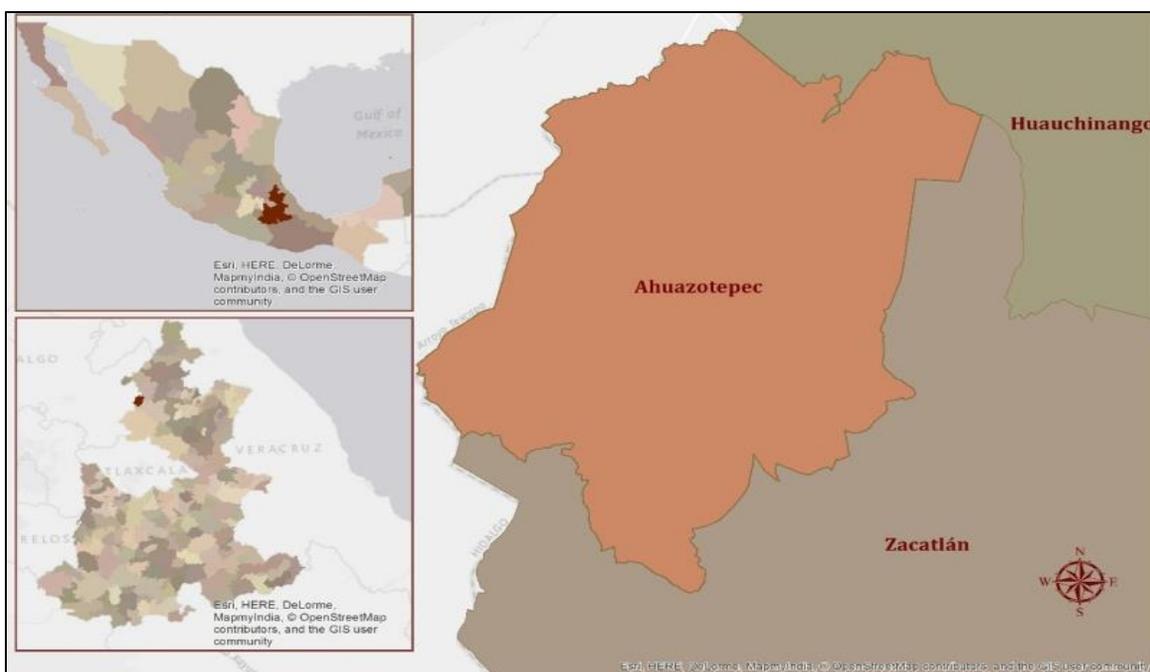
## 5. METODOLOGÍA

### 5.1. Contexto Físico

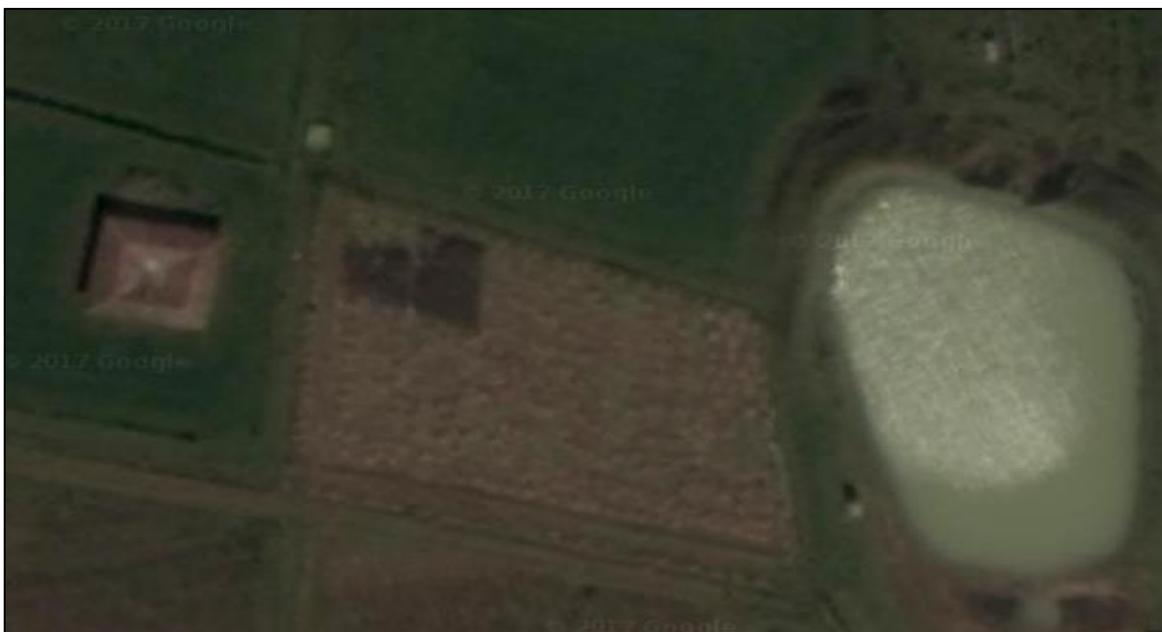
#### 5.1.1. Ubicación geográfica

El Municipio de Ahuazotepec se ubica al norte del estado de Puebla Figura 3; **Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, colinda al norte con el estado de Hidalgo y el municipio de Huauchinango, al este con los municipios de Huauchinango y Zacatlán, al sur con el municipio de Zacatlán, al oeste con el municipio de Zacatlán y el estado de Hidalgo. Se encuentra entre las coordenadas 20° 00' y 20° 06' de latitud norte y entre los 98° 05' y 98° 11' de longitud oeste, a una altitud de entre 2280 msnm (INEGI, 2009).

El lote de muestreo se localiza en la comunidad de Laguna seca, en el municipio de Ahuazotepec, Puebla, dentro de la unidad de producción de ovinos “Rancho Laguna Seca”. El área aproximada de la parcela es de 1500 m<sup>2</sup> y presenta la forma que se muestra en la Figura 4.



**Figura 3.** Ubicación del Municipio de Ahuazotepec, Puebla. Elaboración propia (2017)



**Figura 4.** Parcela muestreada Google Maps (2017). Elaboración propia (2018).

### 5.1.2. Características edáficas y climáticas

Ahuazotepec, tiene una superficie de 110.99 km<sup>2</sup>, clima templado húmedo con abundantes lluvias en verano. En la Tabla 1 se presentan las características geoambientales generales del municipio.

**Tabla 1.** Características Climáticas, Fisiográficas. Hidrológicas y Edáficas del Municipio de Ahuazotepec, Puebla.

<b>Ahuazotepec</b>	
<b>Clima</b>	Templado húmedo C(m), con abundantes lluvias en verano, cuenta con una temperatura media anual de 14.4, con temperatura en el mes de abril de 27.5°C como máxima y mínima de hasta -6.6°C en el mes de febrero. Precipitación total anual de 1064.9 mm
<b>Fisiografía</b>	Se ubica en la porción occidental de la Sierra de Puebla, que forma parte de la sierra Madre Oriental
<b>Hidrografía</b>	Se encuentra dentro de la Región hidrológica Tuxpan – Nautla Existen corrientes de agua perennes: Tlamachimalco y Totolapa. Intermitentes: Santa Felix
<b>Uso de Suelo y vegetación</b>	El 77% de la superficie del municipio es de uso agrícola, 21% es zona de bosque y un 3% comprende la zona urbana.
<b>Edafología</b>	Los suelos dominantes en el municipio son Luvisol (63%), Andosol (27%), Durisol (4%), Cambisol (2%).

(INEGI, 2009). Elaboración propia (2017).

## **5.2. Trabajo de campo**

### **5.2.1. Muestreo**

El muestreo de la parcela fue realizado bajo un diseño sistemático en rejilla, el cual debe de tomar distancias regulares entre las muestras. Este tipo de diseño es ideal para cuando se requiere realizar mapas de isolíneas para observar la variación de parámetros superficiales del suelo de la zona de estudio (Valencia & Hernández, 2002).

El muestreo fue sistémico, cada muestra se tomó a una profundidad de 30 cm; con 30 puntos de intersección; los puntos de muestreo se localizan a 12 m de distancia entre columnas y 6.5 m de distancia entre filas, las muestras fueron secadas, molidas y tamizadas para su posterior análisis.

## **5.3. Trabajo de Laboratorio**

El análisis de las propiedades físicas y químicas de suelo se llevó a cabo en el laboratorio de investigación de suelos L-211 de la FESC/UNAM, tomando como guía el Manual de prácticas de laboratorio de Edafología (Valencia, 2016) Los análisis realizados y sus métodos se mencionan a continuación:

### ***Color***

La determinación de color se llevó a cabo en base húmeda y seca del suelo para su posterior comparación con las tablas Munsell, de acuerdo con el manual de prácticas de laboratorio de edafología.

### ***Textura***

Esta determinación se realizó por el método de Bouyucos, cuyo objetivo es determinar el tamaño de las partículas que integran a un suelo (arenas, limos y arcillas).

### ***Densidad real y aparente***

La densidad aparente se realizó por el método de la probeta. Como primer paso se pesó una probeta vacía y se le añadió suelo hasta la marca de 10 ml, se golpeó la probeta en 10 ocasiones y se llenó nuevamente con suelo para alcanzar de nuevo la marca de 10 ml y se pesó. La densidad real se determinó colocando 20 g de suelo en un matraz aforado, se

añadió un poco de agua y se agitó hasta desalojar totalmente el aire, se añadió agua hasta aforar para posteriormente pesar el matraz con la mezcla suelo-agua; se utilizó el mismo matraz para aforarlo con agua y pesarlo, a este se le llama blanco.

### ***Materia orgánica***

El contenido de materia orgánica se determinó por el método de Walkley y Black, el cual tiene como principio la oxidación de la materia orgánica con dicromato de potasio en un medio ácido.

### ***pH real y pH potencial***

Se determinó por el método del potenciómetro. El pH real se determinó pesando 10 g de suelo, se colocaron en un bote de plástico y se añadieron 25 ml de agua destilada pH 7; para la determinación de pH potencial se usaron 25 ml de cloruro de potasio 1 M pH 7, los botes se colocaron en un agitador por 30 min y se dejaron reposar 5 min; posteriormente se tomó la lectura con el potenciómetro.

### ***Calcio y magnesio intercambiables***

Se determinó la cantidad de calcio y magnesio por el método complejométrico con EDTA.

### ***Capacidad de intercambio catiónico***

La CIC se determinó por el método de percolación con cloruro de calcio y titulación con EDTA.

### ***Contenido de nitrógeno, fósforo y potasio***

La medición de estos nutrientes se realizó con ayuda del espectrofotómetro “Hanna Grow Master C 215”. Se determinó nitrógeno amoniacal  $\text{NH}_4^+$  y nítrico  $\text{NO}_3^-$ , se obtuvo una alícuota a partir del filtrado de la solución suelo-agua, posteriormente se agregó a la celda del aparato 10 ml de alícuota junto con el reactivo respectivo para cada determinación. El proceso de medición de  $\text{PO}_4^-$  y  $\text{K}^+$  fue similar a los descritos anteriormente.

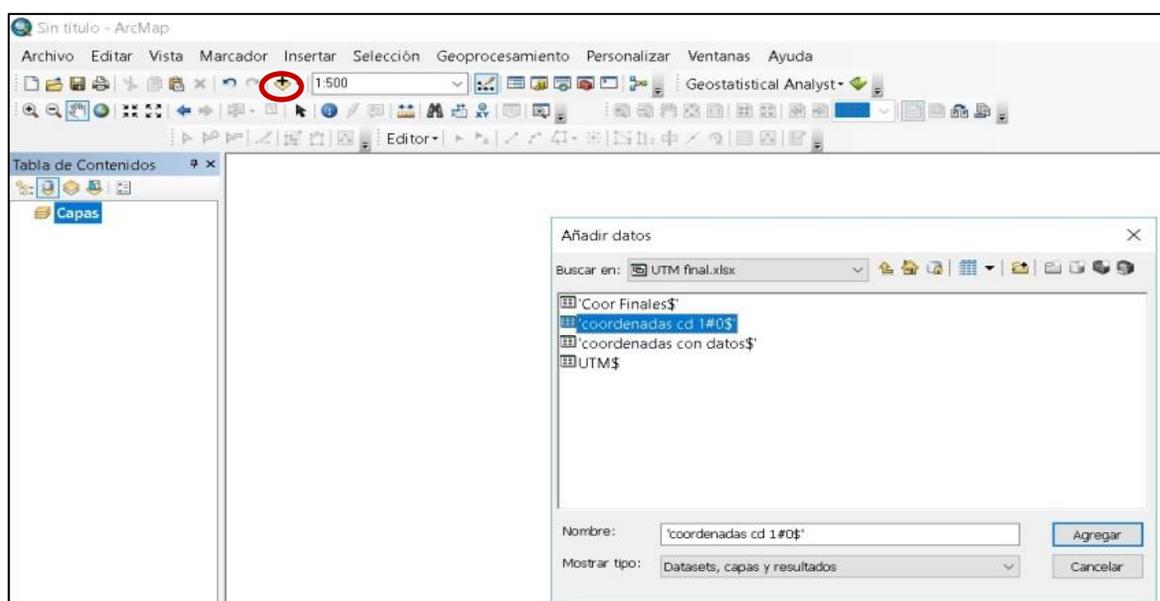
## 5.4. Trabajo de Gabinete

### 5.4.1. Procesamiento geoestadístico de los resultados de laboratorio

Los resultados obtenidos en las determinaciones de laboratorio para las distintas propiedades físicas y químicas, fueron analizados con estadística descriptiva usando el software Minitab 16<sup>®</sup>. Para las variables se obtuvieron medidas de tendencia central: media, mediana; y de dispersión: desviación estándar, rango, varianza y coeficiente de variación.

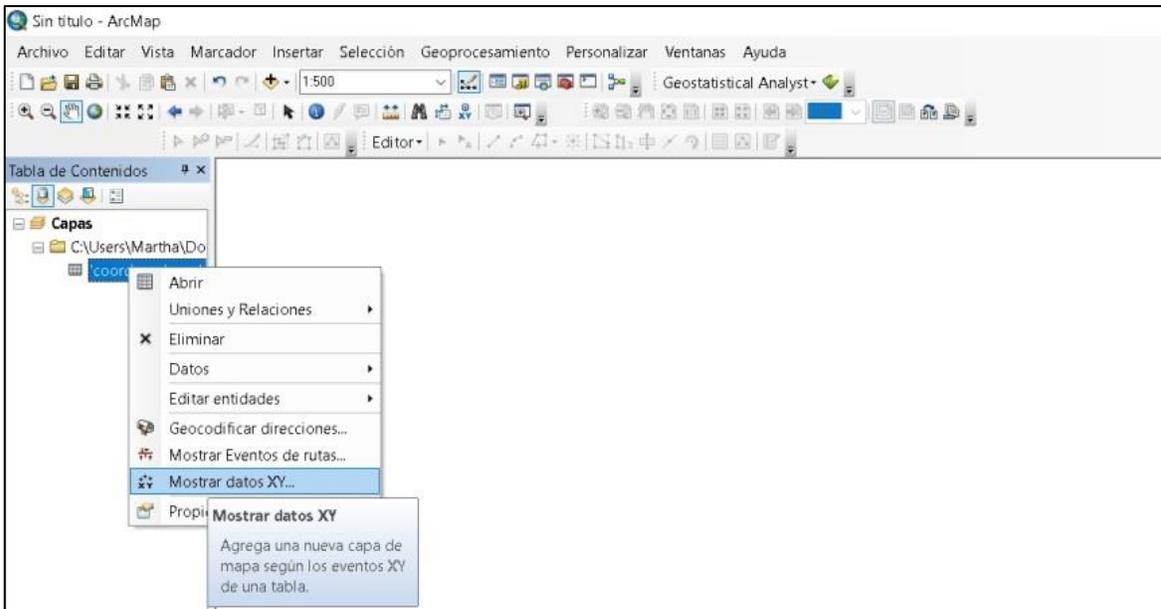
### 5.4.2. Generación de mapas de variabilidad

Los datos experimentales se trabajaron con ArcMap<sup>®</sup> para generar los variogramas y mapas de variabilidad. Para ello, fue necesario convertir las coordenadas GPS (latitud, longitud) a coordenadas UTM. Los datos UTM se refieren al sistema de proyección Universal Transversal de Mercator en el cual el globo terráqueo se divide en 60 zonas septentrionales y meridionales, en la que cada una abarca 6° de longitud (ESRI, 2018). Estos datos se procesaron en una base de datos de Excel<sup>®</sup> cuyos campos fueron las coordenadas UTM y cada una de las variables de laboratorio; los registros corresponden a cada una de las unidades experimentales. La base de datos generada en la hoja de cálculo se añadió a la Tabla de Contenidos de ArcMap (Figura 5).



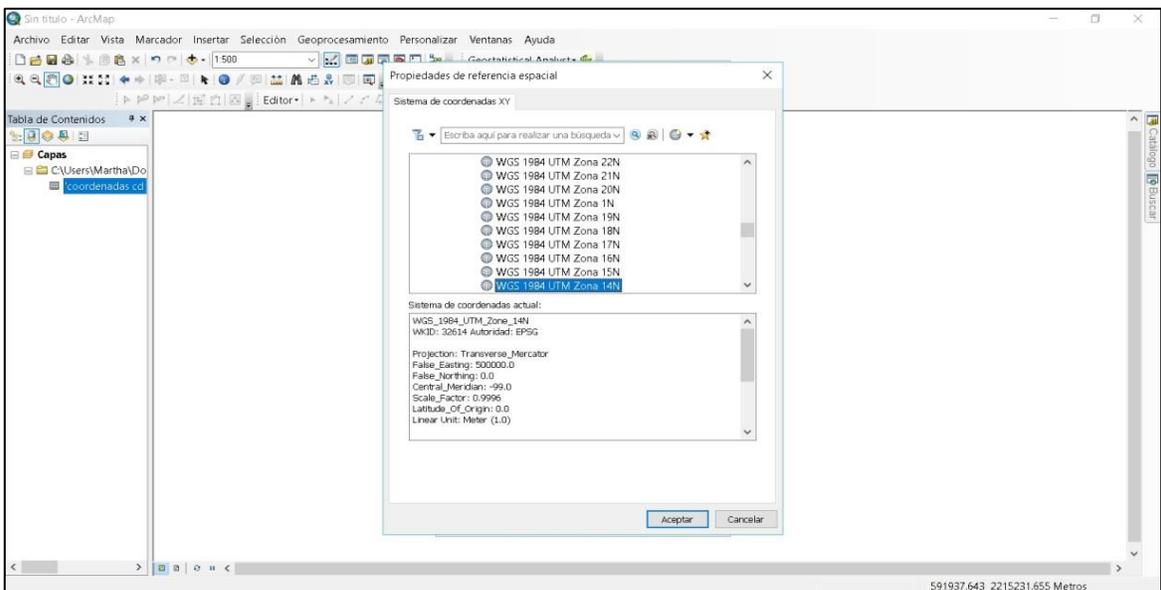
**Figura 5.** Inserción de base de datos Excel en ArcMAP. Elaboración propia (2018).

En la Tabla de Contenidos, se seleccionó el archivo con la base de datos, con clic derecho se seleccionó la opción “mostrar datos XY” Figura 6.



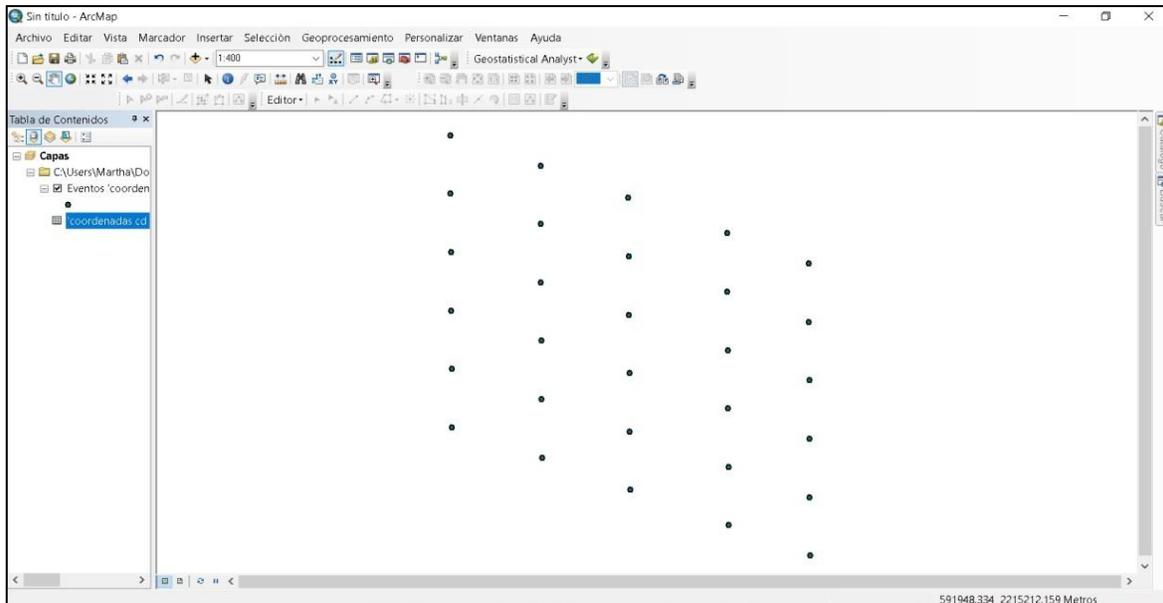
**Figura 6.** Conversión de datos a plano cartesiano XY. Elaboración propia (2018).

El sistema de coordenadas utilizado para los datos fue el WGS 1984 UTM Zona 14N; para asignarlo se seleccionó: “editar”, “sistemas de coordenadas proyectadas”, “UTM”, “WGS 1984”, “hemisferio norte”, “WGS 1984 UTM Zona 14N” y aceptar (Figura 7).



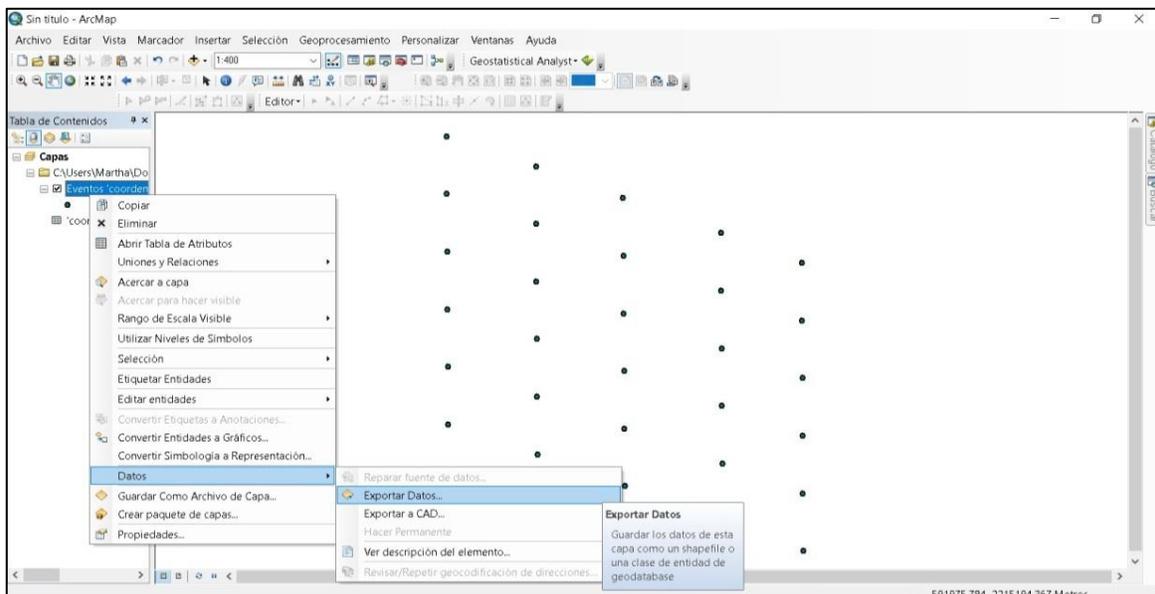
**Figura 7.** Coordenadas UTM para México. Elaboración propia (2018).

Con este proceso se generó un nuevo archivo donde se proyectan los puntos de muestreo que contienen la información de las variables (Figura 8).



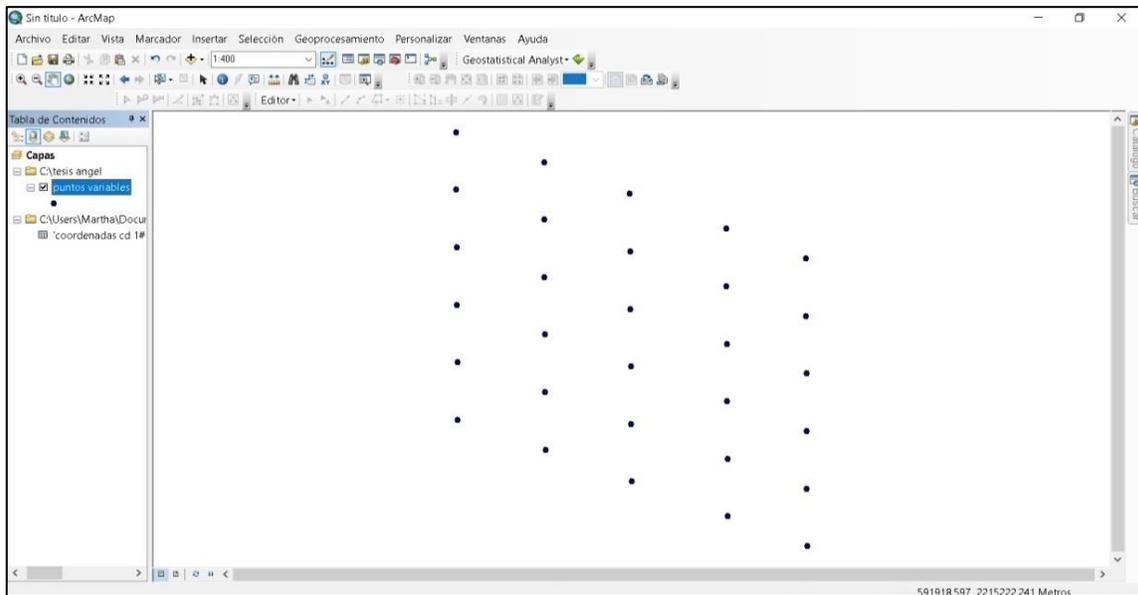
**Figura 8.** Puntos de muestreo georreferenciados. Elaboración propia (2018).

En la “Tabla de contenidos” se seleccionó el archivo con los puntos georreferenciados, clic derecho, “datos”, “exportar datos”; el nuevo archivo con formato vectorial (shapefile) se guarda en una carpeta (Figura 9).



**Figura 9.** Proceso para exportar a shapefile. Elaboración propia (2018).

En la Figura 10; **Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se muestra el shapefile que contiene los puntos de muestreo y las propiedades físicas y químicas obtenidas en el laboratorio.



**Figura 10.** Shapefile de los puntos de muestreo. Elaboración propia (2018).

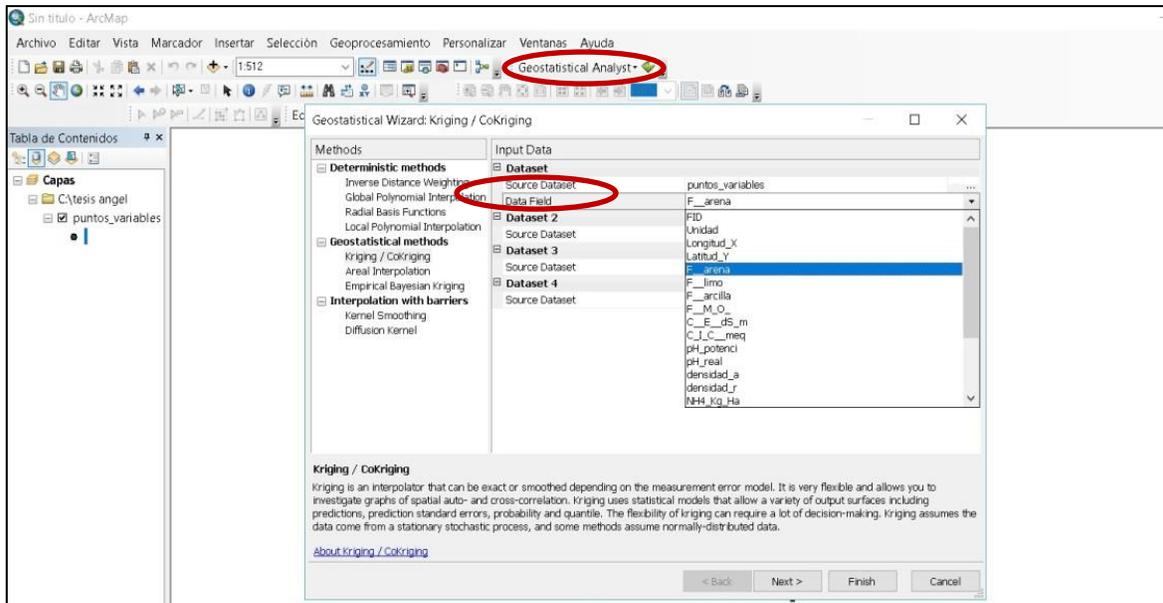
Para realizar el Kriging de las variables de interés, se utilizó la herramienta “Geostatistical Analyst” (Figura 11). El proceso fue: clic en “Geostatistical Analyst”, “Kriging”; los argumentos de la función fueron: “input data” = data field, se seleccionó la variable de interés, el tipo de Kriging fue ordinario y se dio clic en aceptar hasta terminar el proceso.

Una vez terminado el proceso se creó una capa que contiene diferentes contornos que representan categorías con diferentes niveles de incidencia; en la Figura 12 se muestra la variable % de arena.

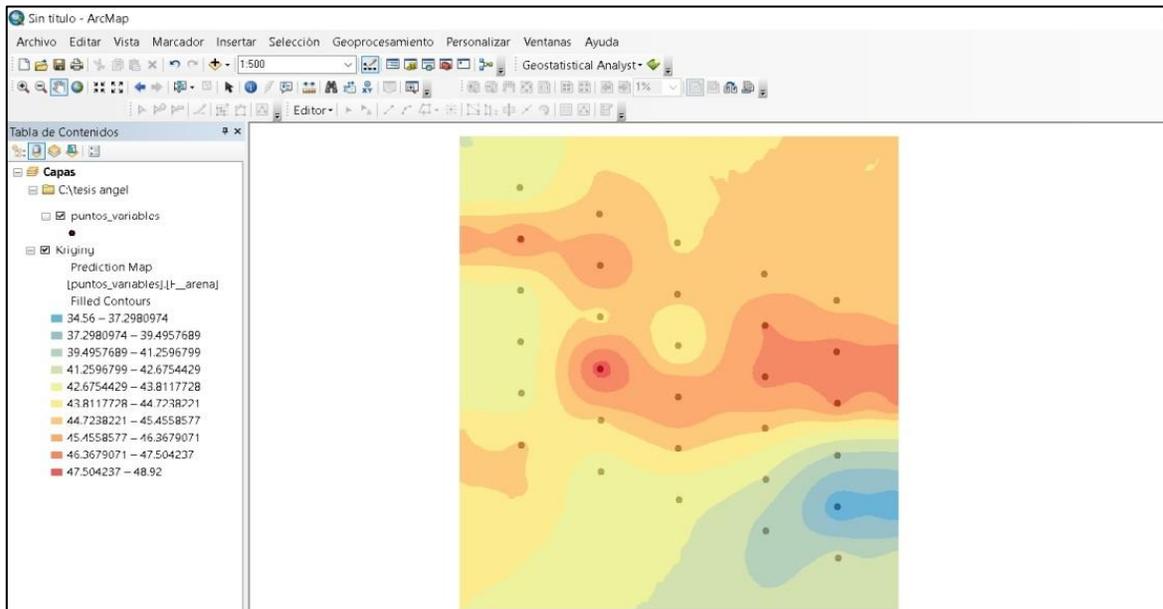
El Kriging creado se guardó como archivo de capa para no perder el proceso; dentro de la Tabla de contenido, se eligió con clic derecho el archivo Kriging, posteriormente se seleccionó “guardar como archivo de capa” (Figura 13).

El archivo de capa se exportó como shapefile para poder recortar el contorno del área de interés; para ello se seleccionó con clic derecho el archivo de capa, “data” y “export to

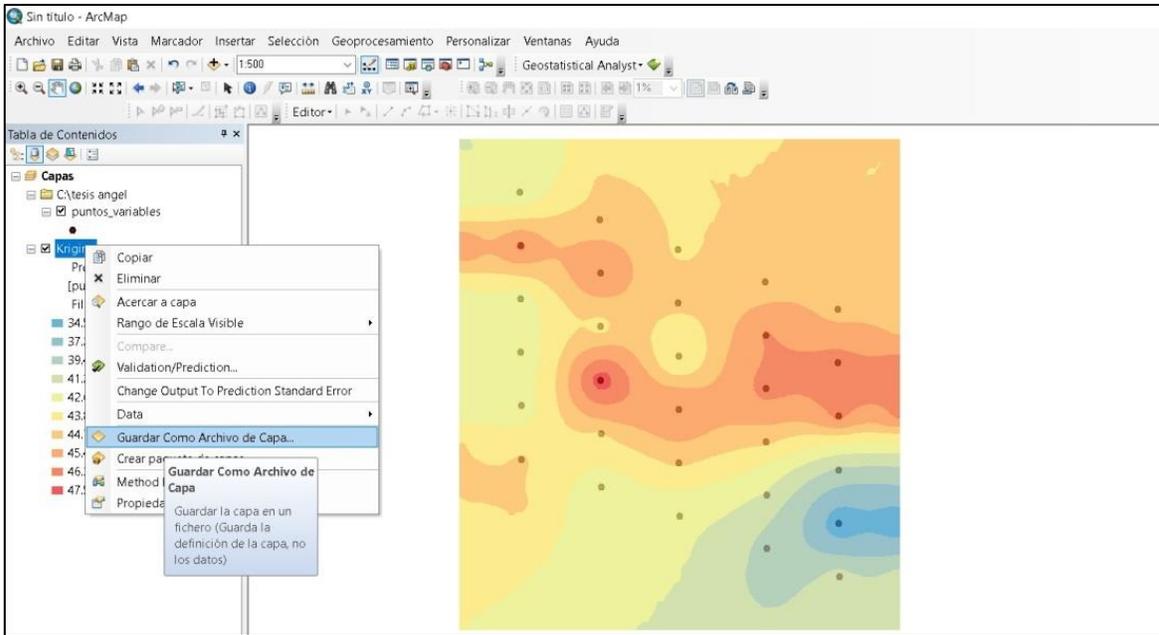
vector”; se seleccionó la opción guardar como shapefile y se asignó un nombre al archivo, se eligió aceptar hasta terminar el proceso. La Figura 14 muestra el proceso descrito.



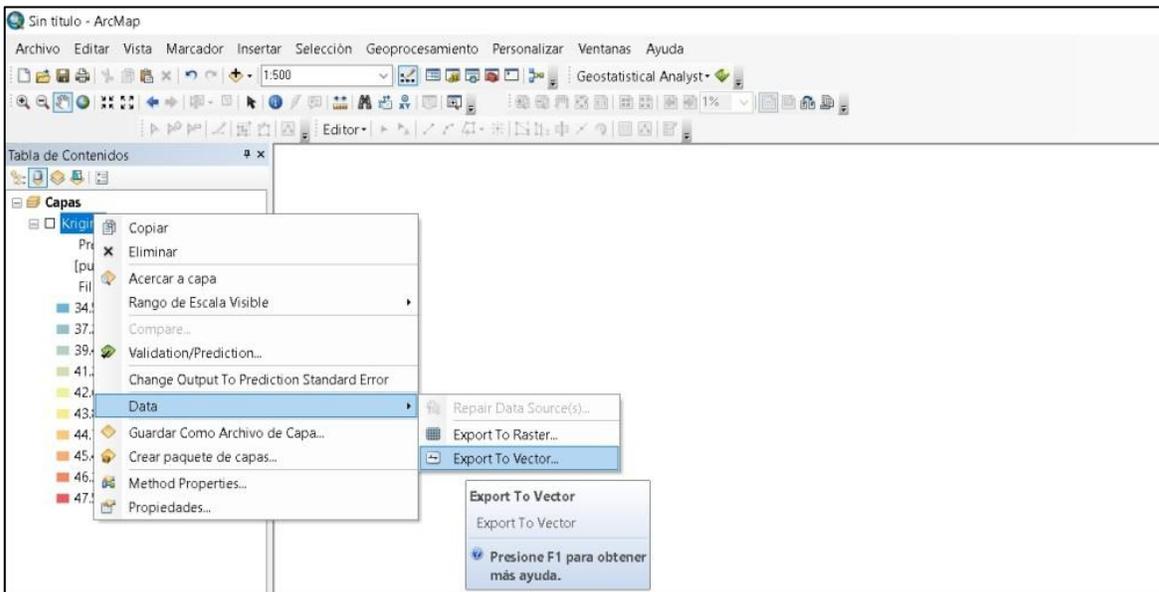
**Figura 11.** Proceso del Kriging. Elaboración propia (2018).



**Figura 12.** Capa de % de arena. Elaboración propia (2018).

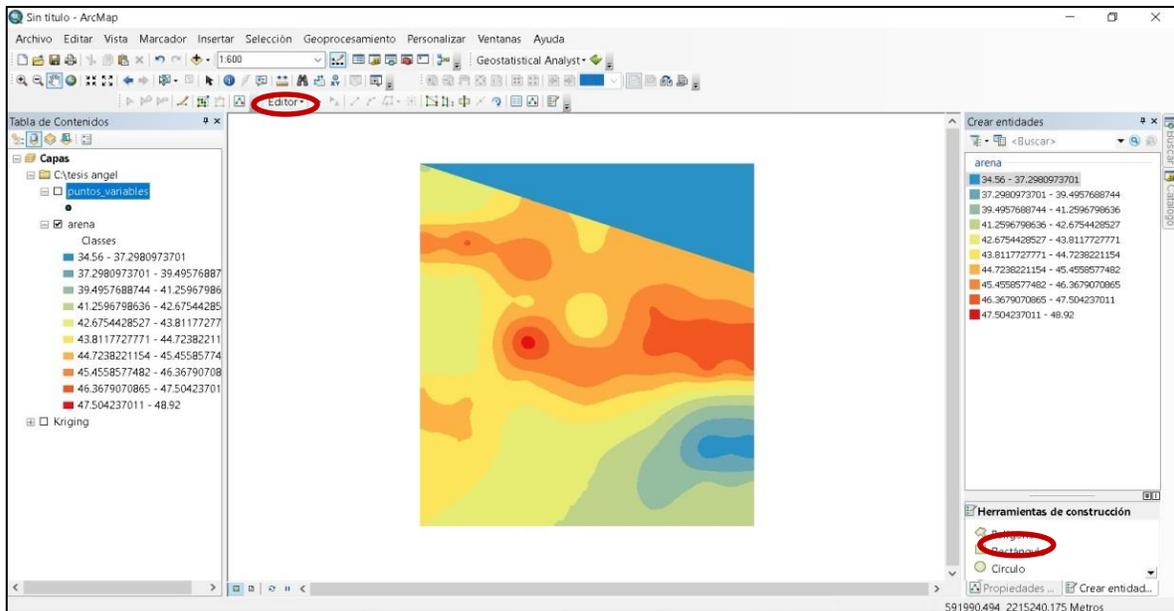


**Figura 13.** Guardar capa como archivo de capa. Elaboración propia (2018).



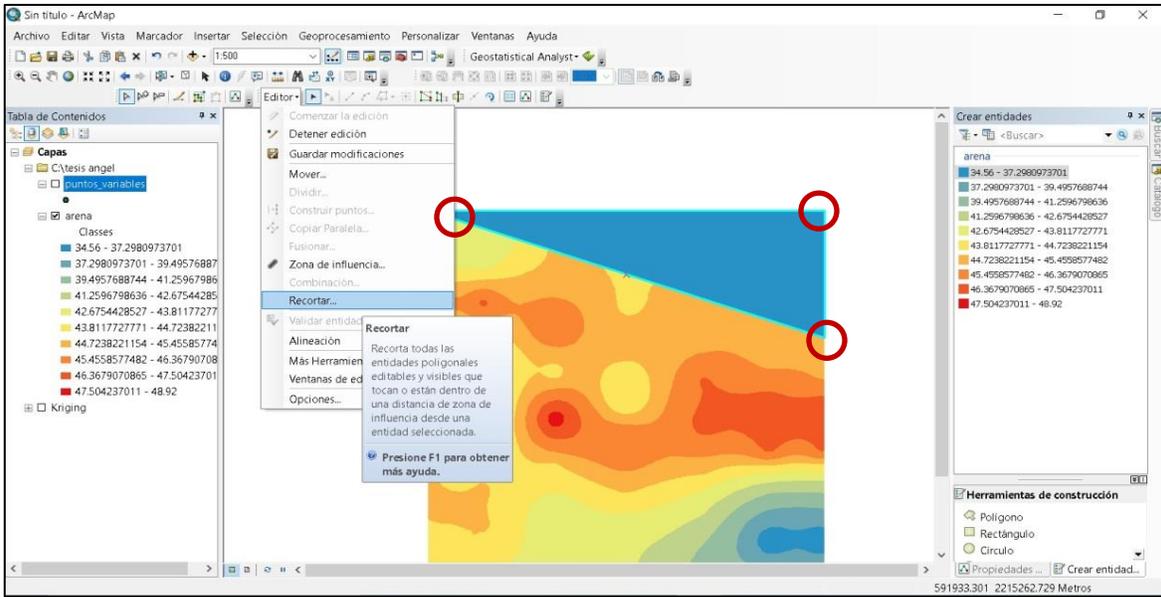
**Figura 14.** Exportar capa como shapefile. Elaboración propia (2018).

Con el shapefile creado, el siguiente paso fue cortar el polígono, es decir, se definió el área de interés. En la pestaña “editor” se eligió la opción “comenzar edición”; en la ventana “herramienta de construcción” se seleccionó la opción “polígono”. La Figura 15 muestra el polígono que se recortó.

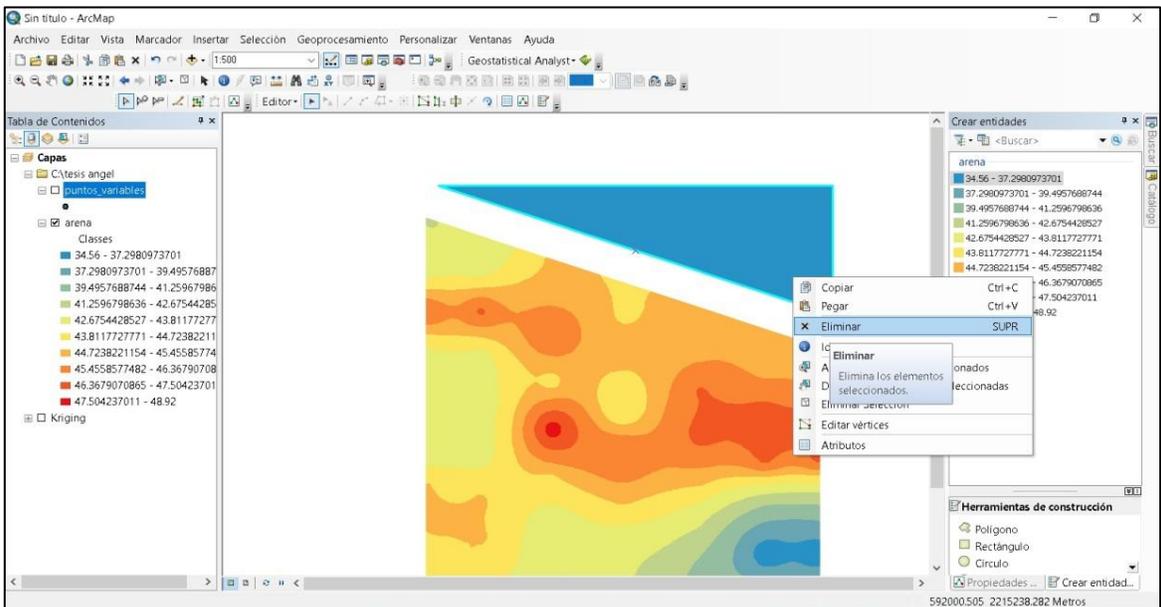


**Figura 15.** Selección de la herramienta de construcción. Elaboración propia (2018).

El proceso de corte consistió en seleccionar con el puntero los puntos del shape que no son parte del área de interés, con clic derecho sobre el polígono, se eligió la opción “terminar boceto”; posteriormente en la pestaña “editor” se seleccionó “recortar”; la Figura 16; **Error! No se encuentra el origen de la referencia.** muestra los puntos del shapefile que no son parte de la parcela. El polígono a recortar se selecciona con clic derecho y se eligió “Eliminar” (Figura 17).

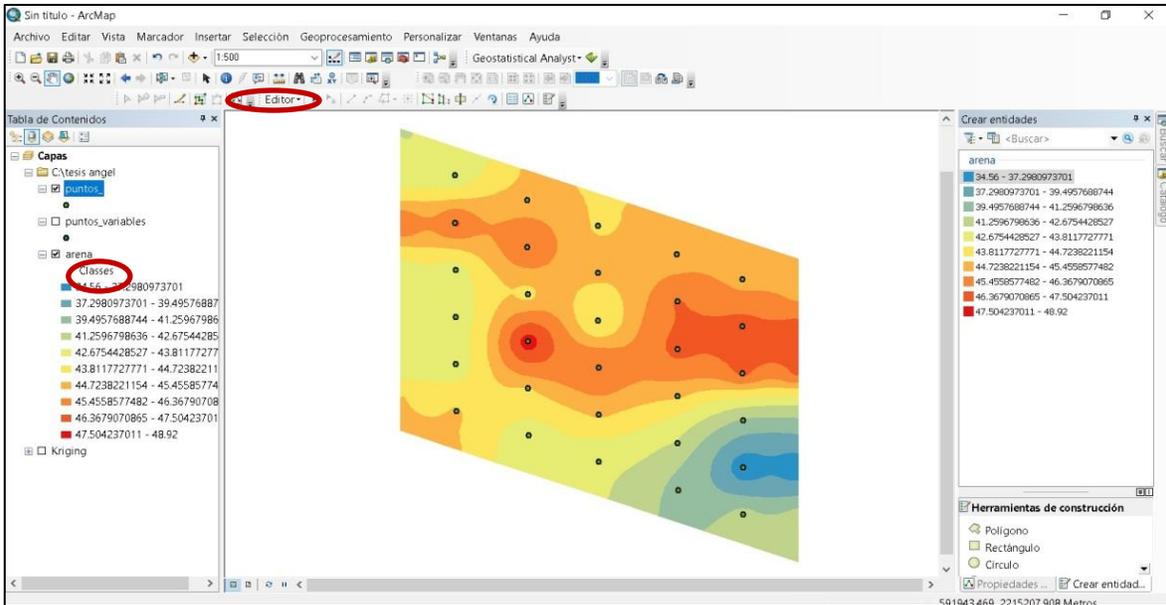


**Figura 16.** Selección del shapefile a recortar. elaboración propia (2018).



**Figura 17.** Recorte del shapefile. Elaboración propia (2018).

Una vez terminado el recorte de las áreas que no son parte de la región de interés, se seleccionó, en la pestaña “editor”, la opción “detener edición”. Como último paso de la edición del shape, se seleccionó con clic derecho dentro de la “tabla de contenido” y se guardó como “archivo de capa” (Figura 18).



**Figura 18.** Mapa de variabilidad recortado al contorno de la parcela. Elaboración propia (2018).

El proceso antes mencionado se realizó para cada una de las variables; una vez obtenidas las capas, se editaron para generar los mapas de variabilidad que se muestran en la sección de resultados.

## 6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 6.1. Valores Estadísticos de las Propiedades Físicas y Químicas del Suelo

#### *Propiedades físicas*

El suelo de la parcela presenta, en su mayoría, textura media que varía de franca a franca arcilloso arenosa; el contenido medio de arena es de 44.2 %, el de limo de 28.47 % y el de arcilla de 27.33 %. El valor medio de 50.73 % de espacio poroso le confiere al suelo un adecuado volumen para retener agua y favorece la aireación; así mismo, la densidad aparente se considera media ( $1.15 \text{ g/cm}^3$ ) (Tabla 2).

	Media	Mediana	Mínimo	Máximo	Desviación estándar	Coefficiente de variación
<b>Arena (%)</b>	44.20	44.74	34.56	48.92	2.70	6.10
<b>Limo (%)</b>	28.47	28.18	20.00	34.36	2.93	10.28
<b>Arcilla (%)</b>	27.33	27.08	21.44	41.44	4.09	14.96
<b>Densidad aparente (<math>\text{g/cm}^3</math>)</b>	1.15	1.16	1.03	1.24	0.05	4.04
<b>Densidad real (<math>\text{g/cm}^3</math>)</b>	2.34	2.36	2.16	2.42	0.06	2.46
<b>Espacio poroso (%)</b>	50.73	50.54	47.79	55.70	1.76	3.47

**Tabla 2.** Medidas de tendencia central y dispersión de los parámetros físicos del suelo.

#### *Propiedades químicas*

De acuerdo con las tablas de interpretación del manual de prácticas de laboratorio de Edafología (Valencia, 2016), se clasificaron los siguientes valores. El porcentaje de materia orgánica promedio fue de 4.13 % se interpreta como un suelo extremadamente rico, el pH del suelo es medianamente ácido con un valor promedio de 6.23; la media de conductividad eléctrica fue de 0.22 dS m<sup>-1</sup>, lo que indica una concentración baja de sales. Por otra parte, la capacidad de intercambio catiónico (CIC) tuvo un valor medio de 12.47 meq 100g<sup>-1</sup>, que se clasifica como muy bajo lo que indica que la capacidad de las partículas del suelo para retener iones es poco eficiente. El porcentaje de saturación de bases promedio fue de 56.54%, el cual se interpreta como una capacidad media de sitios de intercambio que se encuentran ocupados por bases intercambiables (Tabla 3).

El valor promedio del nitrógeno amoniacal fue de 33.38 kg ha<sup>-1</sup> de NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, se interpreta como un suelo con contenido medio; mientras que, el nitrógeno nítrico (NO<sub>3</sub><sup>+</sup>) tuvo un valor medio de 156.8 kg ha<sup>-1</sup> también considerado medio. El contenido de fósforo, en forma de PO<sub>4</sub>, fue de 137 kg ha<sup>-1</sup>, que se considera extra rico. Por otra parte, el contenido medio de potasio, en forma de K<sup>+</sup>, fue de 155.7 kg ha<sup>-1</sup> el cual se considera como bajo. El contenido de calcio y magnesio promedio se interpreta como moderado con 3473.1 y 773.5 kg ha<sup>-1</sup>, respectivamente (Tabla 3).

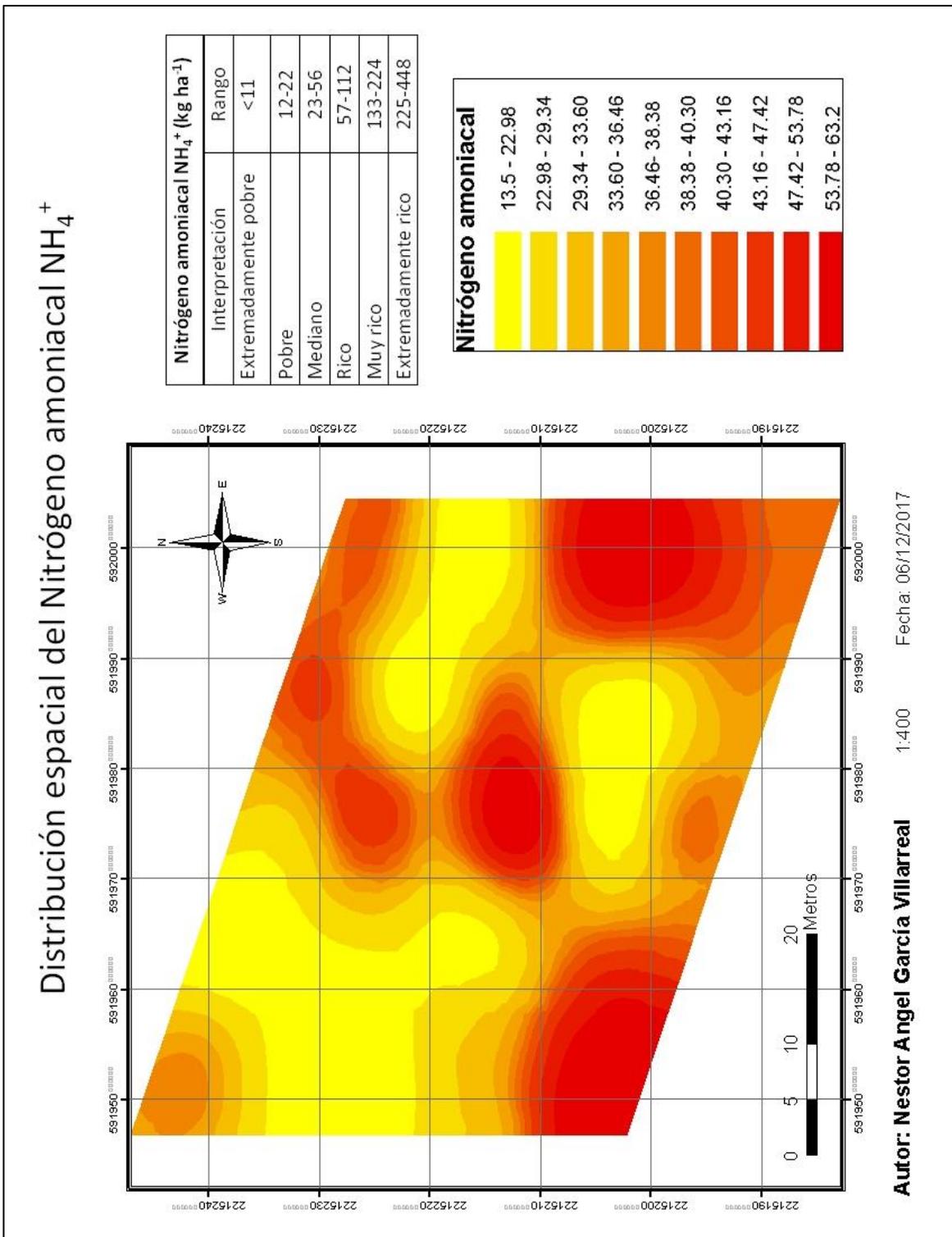
Tabla 3. Medidas de tendencia central y dispersión de los parámetros químicos del suelo.

	Media	Mediana	Mínimo	Máximo	Desviación estándar	Coefficiente de variación
<b>Materia orgánica (%)</b>	4.13	4.16	3.34	5.08	0.42	10.14
<b>Conductividad eléctrica (dS m<sup>-1</sup>)</b>	0.22	0.20	0.11	0.77	0.12	54.10
<b>CIC (meq 100g<sup>-1</sup>)</b>	12.74	12.78	9.97	16.05	1.75	13.70
<b>pH potencial</b>	5.36	5.50	4.85	5.88	0.33	6.25
<b>Saturación de bases (%)</b>	56.54	56.49	42.39	76.07	9.05	16.00
<b>pH real</b>	6.23	6.20	5.94	6.65	0.19	3.06
<b>NH<sub>4</sub><sup>+</sup> (kg ha<sup>-1</sup>)</b>	33.38	34.94	13.50	63.27	13.80	41.34
<b>NO<sub>3</sub><sup>-</sup> (kg ha<sup>-1</sup>)</b>	156.8	154.30	30.30	303.20	58.90	37.58
<b>PO<sub>4</sub><sup>-3</sup> (kg ha<sup>-1</sup>)</b>	137.0	113.10	65.70	355.00	71.20	52.00
<b>K<sup>+</sup> (kg ha<sup>-1</sup>)</b>	155.7	175.09	69.78	256.69	53.87	34.60
<b>Mg<sup>+</sup> (kg ha<sup>-1</sup>)</b>	773.5	767.10	340.70	1200.2	189.10	24.44
<b>Ca<sup>+</sup> (kg ha<sup>-1</sup>)</b>	3473.1	3479.10	2574.30	4009.5	243.10	7.00

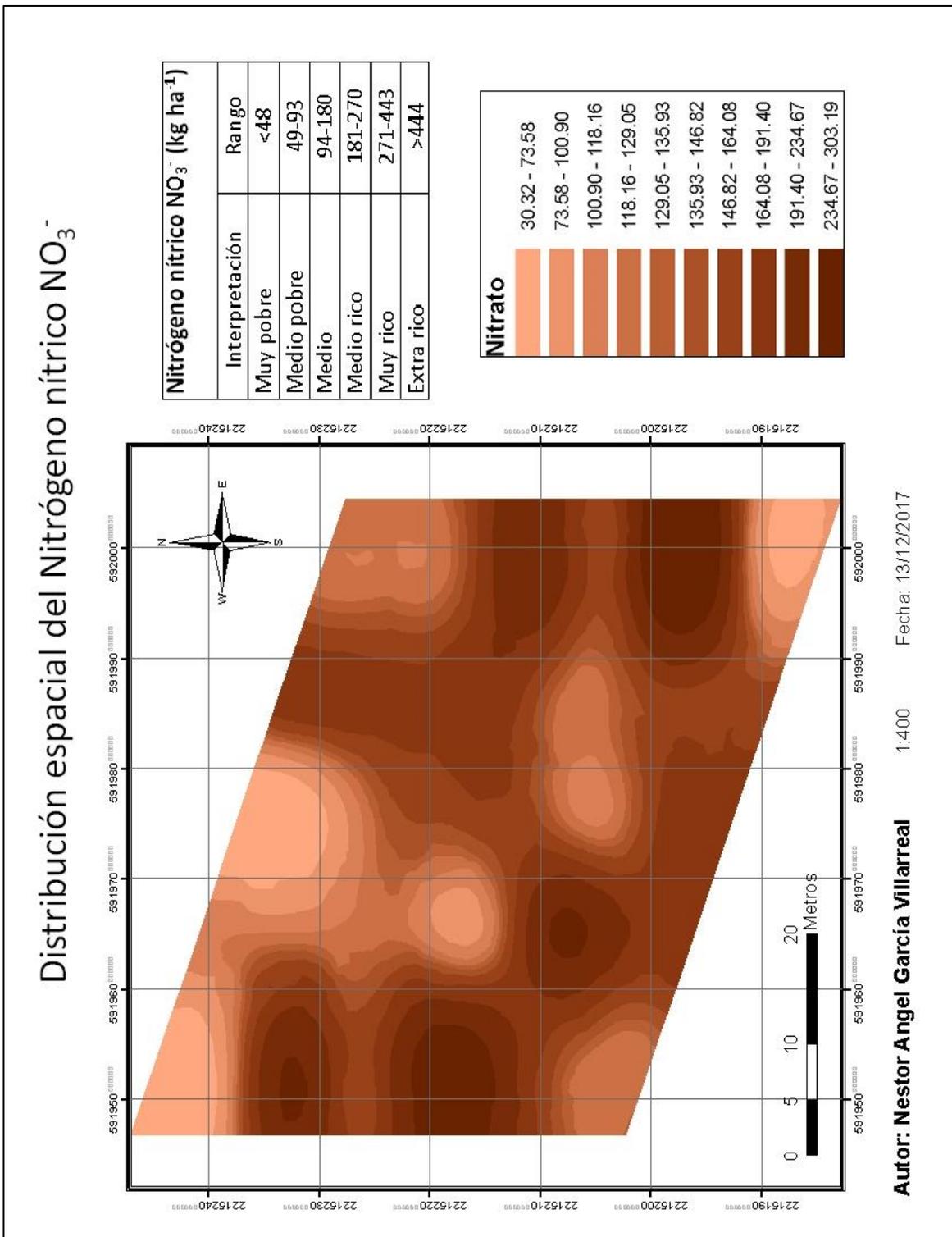
## 6.2. Mapas de Variabilidad

Los mapas de variabilidad son una representación visual de las características del suelo, están divididas en isoclinas que representan categorías con un rango de valor; en este trabajo fueron diseñados para tener 10 categorías. La **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** muestra el mapa de variabilidad espacial del nitrógeno amoniacal presente en la parcela; la incidencia de las zonas con déficit o pobres es mayor que las zonas con valores medios o ricos. El nitrógeno nítrico, muestra mayor incidencia de zonas con concentración que va de media a muy rica (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**). La cantidad de nitrógeno total disponible para las plantas tuvo valores entre 29.10 y 60.96 kg ha<sup>-1</sup> en la mitad del terreno; el resto del terreno presenta valores entre 60.96 y 109.53 kg ha<sup>-1</sup>(**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**).

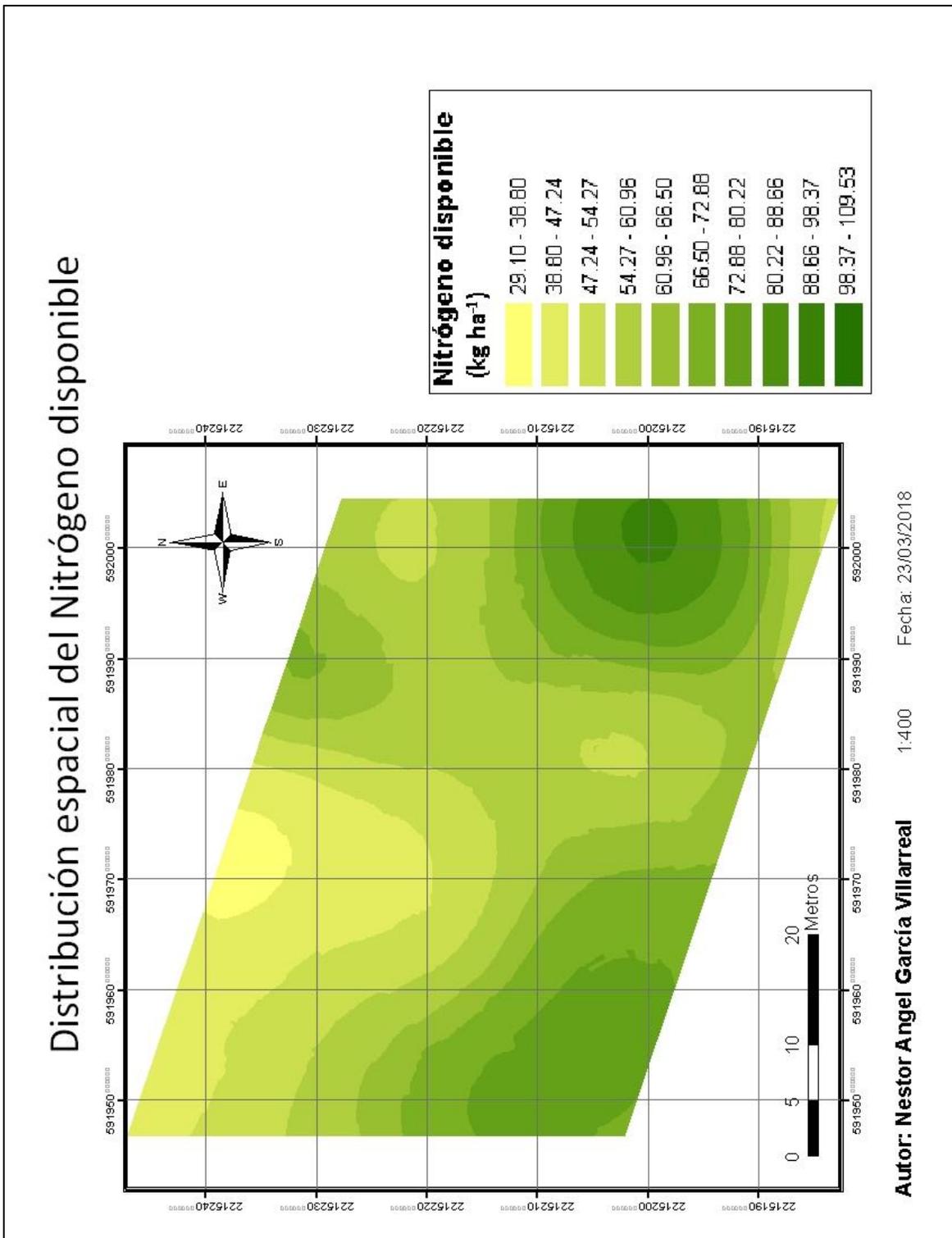
La distribución del fósforo muestra un comportamiento heterogéneo en el terreno, con valores que van desde medio-rico hasta extra-rico (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**). Esto demuestra que el fósforo se encuentra disponible en la parcela y no sería un factor limitante para la nutrición de las plantas. El contenido de potasio presentó valores entre muy bajo y bajo (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**). Entonces existe la necesidad de utilizar, en algunos puntos, una mayor cantidad de fertilizante. El porcentaje de materia orgánica (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**) varía de zonas ricas a extremadamente ricas, por lo que se dispone una cantidad alta de materia orgánica en la unidad de producción.



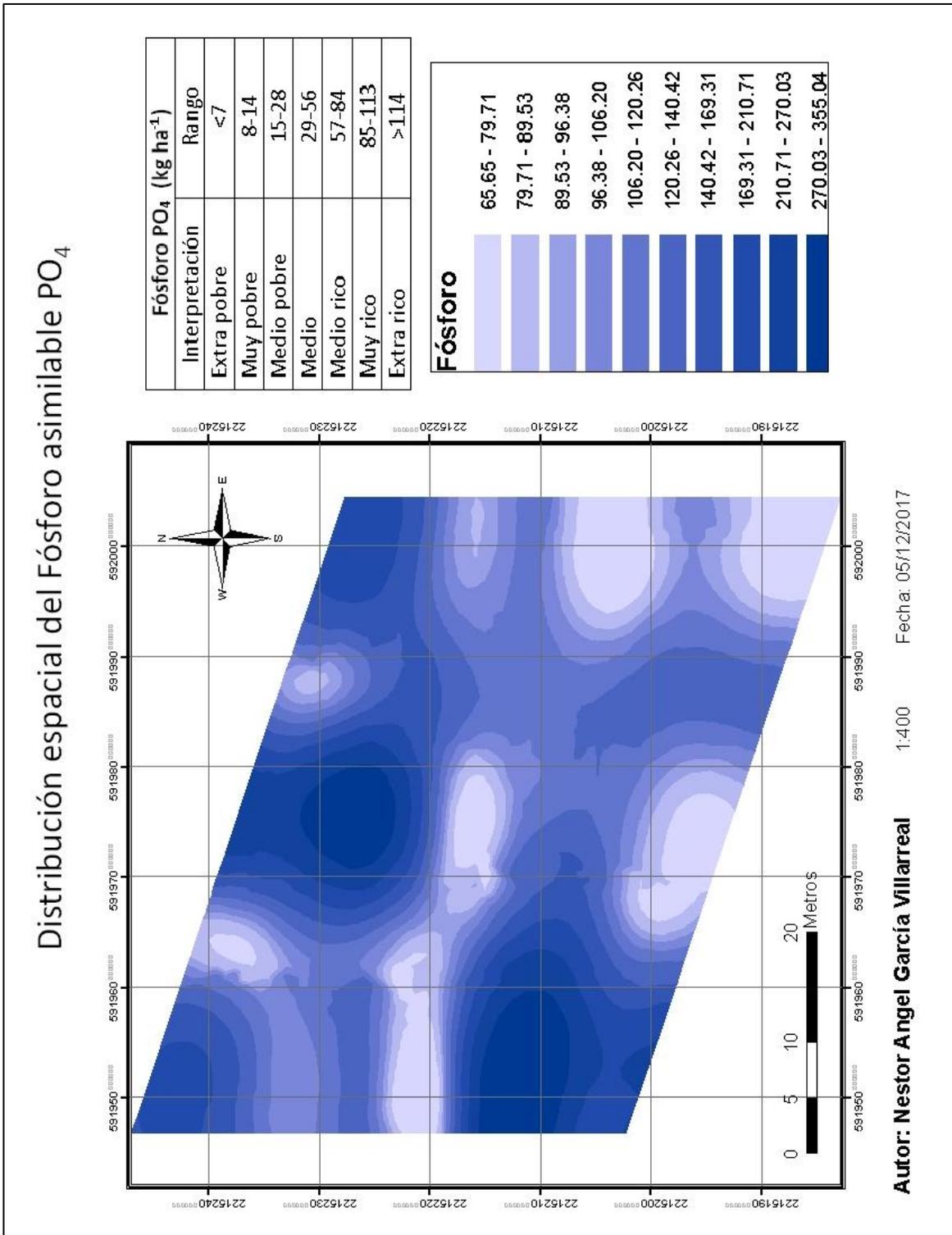
**Figura 19.** Distribución espacial del Nitrógeno amoniacal. Elaboración propia (2017).



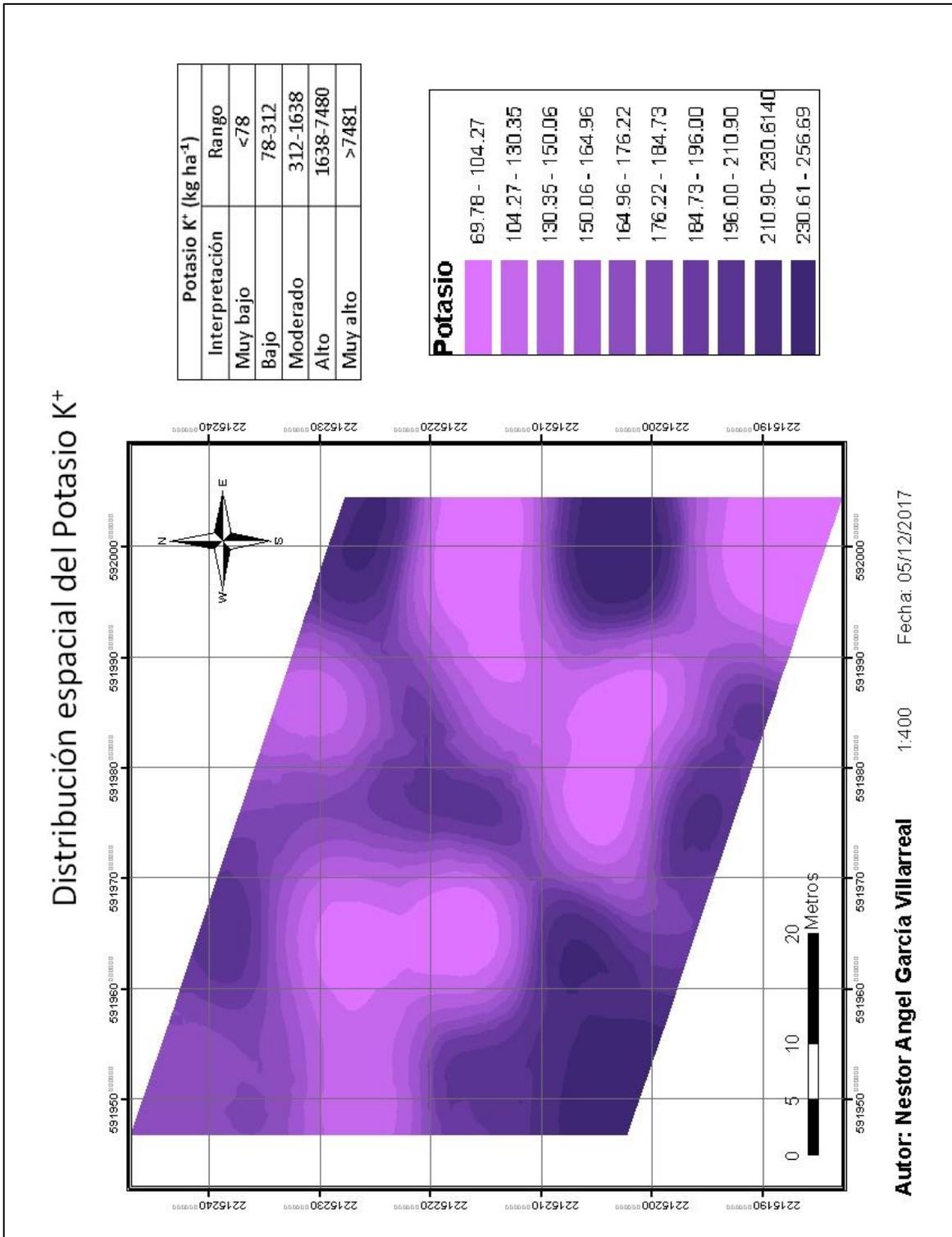
**Figura 20.** Distribución espacial del Nitrógeno nítrico. Elaboración propia (2017).



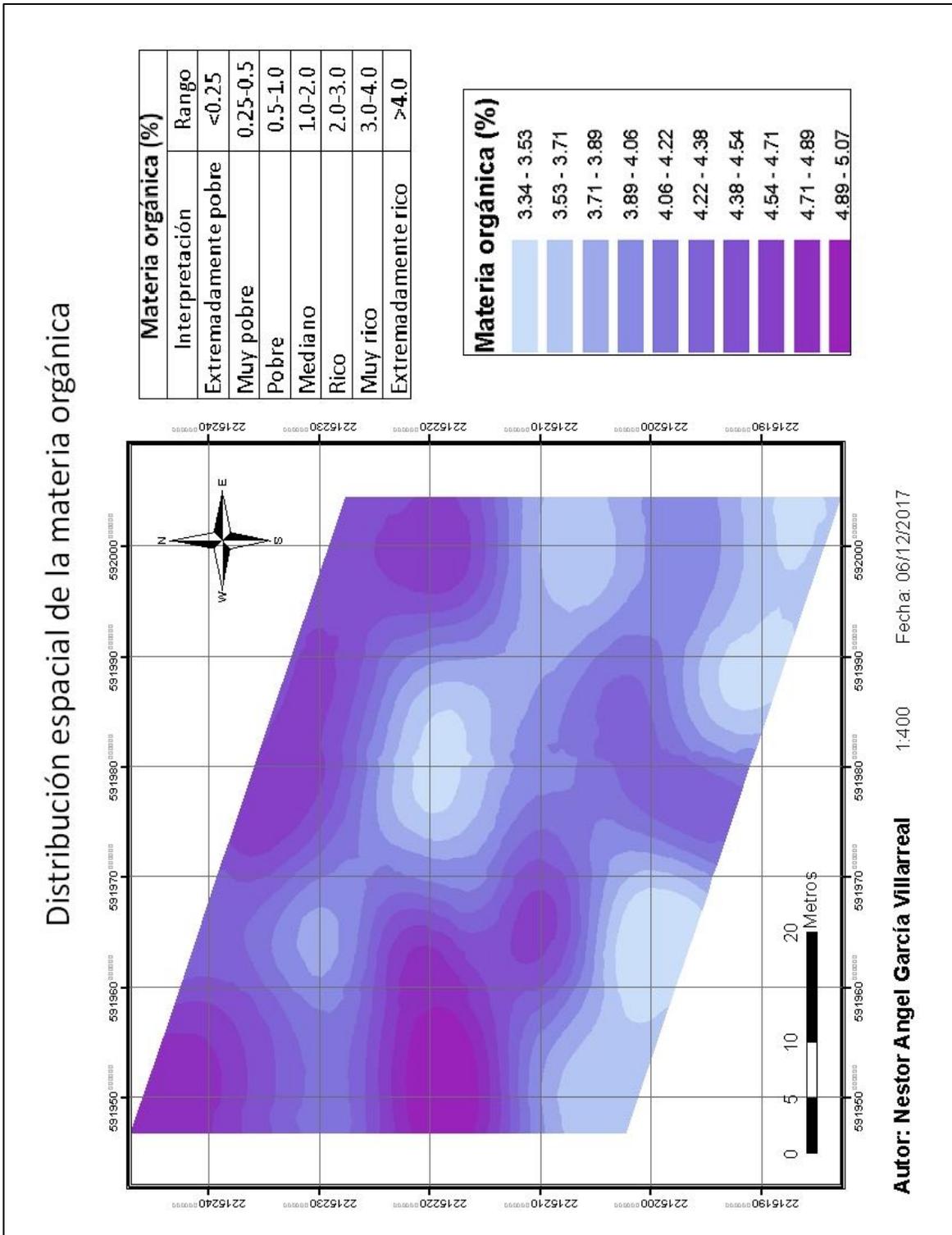
**Figura 21.** Distribución espacial del nitrógeno disponible. Elaboración propia (2018).



**Figura 22.** Distribución espacial del Fósforo asimilable. Elaboración propia (2017).



**Figura 23.** Distribución espacial del Potasio asimilable. Elaboración propia (2017).



**Figura 24.** Distribución espacial de la materia orgánica. Elaboración propia (2017).

### 6.3. Propuesta de Fertilización con Manejo Sitio-específico

La propuesta de fertilización del cultivo de maíz se calculó a partir de la demanda nutrimental del cultivo y la disponibilidad en el terreno. En la Tabla 4 se presenta la cantidad demandada de los principales macronutrientes para el cultivo de maíz, para obtener un rendimiento de 9414 kg ha<sup>-1</sup> de acuerdo con Bundy (1998).

**Tabla 4.** Demanda nutritiva de maíz para un rendimiento de 9.4 t ha<sup>-1</sup>

<b>Nutriente (kg ha<sup>-1</sup>)</b>	<b>Grano</b>	<b>Rastrojo</b>	<b>Total</b>
Nitrógeno	133.43	56.71	190.14
Fósforo	27.55	6.76	34.31
Potasio	34.33	138.99	173.32
Calcio	1.11	32.25	33.36
Magnesio	8.90	23.35	32.25

Elaboración propia (2018) a partir de (Bundy, 1998).

#### 6.3.1. Propuesta de fertilización 1

Para la primera propuesta de fertilización se sugieren como fuentes los fertilizantes: triple 17 (17N-17P-17K), nitrato de potasio (13N-00P-46K) y urea (46N-00P-00K). Para determinar la cantidad necesaria de cada fertilizante se calculó la cantidad de fósforo, debido a que es el nutriente que se demanda en menor cantidad; posteriormente, se calculó la cantidad de potasio y finalmente el nitrógeno; los valores se obtuvieron para cada punto de muestreo. En la Tabla 5 se presentan las necesidades de triple 17 para obtener los 34.31 kg ha<sup>-1</sup> requeridos de fósforo. Como fuente de potasio se propone utilizar nitrato de potasio, para cada punto se calcularon las necesidades considerando el aporte del suelo y el aporte que se hizo con el triple 17, se consideró una demanda de 173.32 kg ha<sup>-1</sup>. Para cumplir con la demanda de nitrógeno (190.14 kg ha<sup>-1</sup>), se propone adicionar urea; para determinar la cantidad necesaria se consideraron los aportes del Triple 17, del nitrato de potasio y la cantidad disponible en el suelo (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**).

**Tabla 5.** Cantidad requerida de Triple 17 para satisfacer la demanda del cultivo.

<b>Punto</b>	<b>Cantidad de P en el suelo (kg ha<sup>-1</sup>)</b>	<b>Exceso (kg ha<sup>-1</sup>)</b>	<b>Déficit (kg ha<sup>-1</sup>)</b>	<b>Triple 17 requerido (kg ha<sup>-1</sup>)</b>	<b>Cantidad de fertilizante requerido con eficiencia de fertilización de 80% (kg*ha<sup>-1</sup>)</b>
1	53.89	19.58	0.00	0.00	0.00
2	28.15	0.00	6.16	83.00	103.75
3	83.99	49.68	0.00	0.00	0.00
4	31.25	0.00	3.06	41.24	51.55
5	56.58	22.27	0.00	0.00	0.00
6	32.30	0.00	2.01	27.12	33.90
7	43.58	9.27	0.00	0.00	0.00
8	112.14	77.83	0.00	0.00	0.00
9	48.11	13.80	0.00	0.00	0.00
10	32.46	0.00	1.85	24.92	31.15
11	42.08	7.77	0.00	0.00	0.00
12	33.27	0.00	1.04	14.00	17.50
13	31.54	0.00	2.77	37.35	46.69
14	37.26	2.95	0.00	0.00	0.00
15	36.26	1.95	0.00	0.00	0.00
16	28.02	0.00	6.29	84.84	106.05
17	36.61	2.30	0.00	0.00	0.00
18	35.20	0.89	0.00	0.00	0.00
19	37.19	2.88	0.00	0.00	0.00
20	21.42	0.00	12.89	173.69	217.11
21	115.85	81.54	0.00	0.00	0.00
22	58.41	24.10	0.00	0.00	0.00
23	38.47	4.16	0.00	0.00	0.00
24	41.88	7.57	0.00	0.00	0.00
25	32.57	0.00	1.74	23.49	29.36
26	70.50	36.19	0.00	0.00	0.00
27	30.25	0.00	4.06	54.77	68.46
28	25.53	0.00	8.78	118.32	147.90
29	41.69	7.38	0.00	0.00	0.00
30	24.46	0.00	9.85	132.75	165.94

Elaboración propia (2018).

Tabla 6. Cantidad requerida de nitrato de potasio para satisfacer la demanda del cultivo.

<b>Punto</b>	<b>Cantidad de K en suelo (kg ha<sup>-1</sup>)</b>	<b>Exceso (kg ha<sup>-1</sup>)</b>	<b>Déficit (kg ha<sup>-1</sup>)</b>	<b>K aportado por Triple 17 (kg ha<sup>-1</sup>)</b>	<b>K requerido (kg ha<sup>-1</sup>)</b>	<b>Nitrato de potasio (kg ha<sup>-1</sup>)</b>	<b>Cantidad de fertilizante requerido con eficiencia de fertilización de 80% (kg*ha<sup>-1</sup>)</b>
<b>1</b>	172.18	0.00	1.14	0.00	1.14	2.99	3.73
<b>2</b>	198.43	25.11	0.00	14.63	0.00	0.00	0.00
<b>3</b>	178.00	4.68	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
<b>4</b>	124.82	0.00	48.50	7.27	41.23	108.51	135.64
<b>5</b>	211.87	38.55	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
<b>6</b>	167.70	0.00	5.62	4.78	0.84	2.20	2.75
<b>7</b>	93.72	0.00	79.60	0.00	79.60	209.48	261.85
<b>8</b>	181.96	8.64	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
<b>9</b>	185.53	12.21	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
<b>10</b>	74.09	0.00	99.23	4.39	94.84	249.58	311.97
<b>11</b>	112.04	0.00	61.28	0.00	61.28	161.27	201.59
<b>12</b>	97.92	0.00	75.40	2.47	72.93	191.93	239.91
<b>13</b>	195.95	22.63	0.00	6.58	0.00	0.00	0.00
<b>14</b>	113.38	0.00	59.94	0.00	59.94	157.73	197.17
<b>15</b>	130.36	0.00	42.96	0.00	42.96	113.04	141.31
<b>16</b>	184.30	10.98	0.00	14.95	0.00	0.00	0.00
<b>17</b>	73.10	0.00	100.22	0.00	100.22	263.73	329.66
<b>18</b>	182.79	9.47	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
<b>19</b>	113.19	0.00	60.13	0.00	60.13	158.24	197.80
<b>20</b>	256.69	83.37	0.00	30.61	0.00	0.00	0.00
<b>21</b>	202.45	29.13	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
<b>22</b>	219.59	46.27	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
<b>23</b>	76.83	0.00	96.49	0.00	96.49	253.93	317.42
<b>24</b>	83.64	0.00	89.68	0.00	89.68	235.99	294.99
<b>25</b>	164.31	0.00	9.01	4.14	4.87	12.82	16.02
<b>26</b>	237.13	63.81	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
<b>27</b>	184.77	11.45	0.00	9.65	0.00	0.00	0.00
<b>28</b>	203.95	30.63	0.00	20.85	0.00	0.00	0.00
<b>29</b>	180.40	7.08	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
<b>30</b>	69.78	0.00	103.54	23.40	80.14	210.89	263.62

Elaboración propia (2018).

Tabla 7. Cantidad requerida de urea para satisfacer la demanda del cultivo.

Punto	Cantidad de N en suelo (kg ha <sup>-1</sup> )	Déficit (kg ha <sup>-1</sup> )	Cantidad requerida de N con 80 % de eficiencia (kg ha <sup>-1</sup> )	N aportado KNO <sub>3</sub> (kg ha <sup>-1</sup> )	N aportado Triple 17 (kg ha <sup>-1</sup> )	N requerido (kg ha <sup>-1</sup> )	Cantidad de urea requerida (kg ha <sup>-1</sup> )
1	41.25	148.89	186.11	0.49	0.00	185.63	398.34
2	38.03	152.11	190.14	0.00	17.64	172.50	370.17
3	29.09	161.05	201.31	0.00	0.00	201.31	431.99
4	74.54	115.60	144.50	17.63	8.76	118.10	253.44
5	58.26	131.88	164.85	0.00	0.00	164.85	353.75
6	66.11	124.03	155.04	0.36	5.76	148.91	319.56
7	45.18	144.96	181.20	34.04	0.00	147.16	315.78
8	64.73	125.41	156.76	0.00	0.00	156.76	336.40
9	51.35	138.79	173.49	0.00	0.00	173.49	372.29
10	44.76	145.38	181.72	40.56	5.30	135.87	291.57
11	45.51	144.63	180.78	26.21	0.00	154.58	331.71
12	47.21	142.93	178.66	31.19	2.97	144.50	310.09
13	29.74	160.40	200.50	0.00	7.94	192.56	413.22
14	72.63	117.51	146.89	25.63	0.00	121.25	260.20
15	76.04	114.10	142.62	18.37	0.00	124.25	266.64
16	80.63	109.51	136.89	0.00	18.03	118.86	255.07
17	38.38	151.76	189.70	42.86	0.00	146.85	315.12
18	84.36	105.78	132.23	0.00	0.00	132.23	283.75
19	49.52	140.62	175.78	25.71	0.00	150.06	322.03
20	81.99	108.15	135.18	0.00	36.91	98.27	210.89
21	72.30	117.84	147.30	0.00	0.00	147.30	316.09
22	82.34	107.80	134.75	0.00	0.00	134.75	289.15
23	38.41	151.73	189.66	41.26	0.00	148.40	318.45
24	50.53	139.61	174.51	38.35	0.00	136.16	292.19
25	109.54	80.60	100.76	2.08	4.99	93.68	201.03
26	75.95	114.19	142.74	0.00	0.00	142.74	306.30
27	72.84	117.30	146.63	0.00	11.64	134.99	289.68
28	69.68	120.46	150.58	0.00	25.14	125.43	269.17
29	62.44	127.70	159.62	0.00	0.00	159.62	342.54
30	52.33	137.81	172.26	34.27	28.21	109.78	235.57

Elaboración propia (2018).

Considerando la superficie de la parcela y los requerimientos calculados para cada punto se necesitan en total 5.1 kg de Triple 17, con un costo total de \$ 42.71; 14.58 kg de nitrato de potasio con un costo total de \$ 306.12; y 46.36 kg de urea con un costo total de \$ 315.25. El costo total para fertilizar la parcela muestreada con la primera propuesta de fertilización es de \$ 664.08, extrapolarlo a una hectárea el costo sería de \$ 4427.20.

### **6.3.2. Propuesta de fertilización 2**

En la segunda propuesta de fertilización se propone utilizar como fuentes los fertilizantes: Fosfato monoamónico (11N-52P-00K), nitrato de potasio (13N-00P-46K) y urea (46N-00P-00K). En la Tabla 8; **Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se presentan las necesidades de nitrato de potasio para obtener los 173.32 kg ha<sup>-1</sup> requeridos. Como fuente de fósforo se propone utilizar fosfato monoamónico, se consideró una demanda de 34.31 kg ha<sup>-1</sup> **Error! No se encuentra el origen de la referencia.** Para cumplir con la demanda de nitrógeno (190.14 kg ha<sup>-1</sup>), se propone adicionar urea, para determinar la cantidad necesaria se consideraron los aportes del Fosfato monoamónico, del nitrato de potasio y la cantidad disponible en el suelo (**Error! No se encuentra el origen de la referencia.**).

En términos de kg por superficie de cada punto de muestreo, se requerirán en total 15.34 kg de nitrato de potasio, con un costo total de \$322.16; 1.40 kg de fosfato mono amónico con un costo total de \$12.47; y 47.64 kg de urea con un costo total de \$323.96. Lo que da un total de \$658.59 de costo por la superficie de 1500m<sup>2</sup> con la propuesta de fertilización 2. El estimado del costo de fertilización por hectárea es de \$4390.6.

**Tabla 8.** Requerimiento de nitrato de potasio 2.

<b>Punto</b>	<b>Cantidad de K en suelo (kg ha<sup>-1</sup>)</b>	<b>Exceso (kg ha<sup>-1</sup>)<sup>1</sup></b>	<b>Déficit (kg ha<sup>-1</sup>)</b>	<b>Fertilizante requerido Nitrato de Potasio (kg ha<sup>-1</sup>)</b>	<b>Cantidad de fertilizante requerido con una eficiencia de fertilización 80% (kg ha<sup>-1</sup>)</b>
1	172.18	0.00	1.14	2.99	3.73
2	198.43	25.11	0.00	0.00	0.00
3	178.00	4.68	0.00	0.00	0.00
4	124.82	0.00	48.50	127.64	159.55
5	211.87	38.55	0.00	0.00	0.00
6	167.70	0.00	5.62	14.78	18.48
7	93.72	0.00	79.60	209.48	261.85
8	181.96	8.64	0.00	0.00	0.00
9	185.53	12.21	0.00	0.00	0.00
10	74.09	0.00	99.23	261.14	326.42
11	112.04	0.00	61.28	161.27	201.59
12	97.92	0.00	75.40	198.42	248.03
13	195.95	22.63	0.00	0.00	0.00
14	113.38	0.00	59.94	157.73	197.17
15	130.36	0.00	42.96	113.04	141.31
16	184.30	10.98	0.00	0.00	0.00
17	73.10	0.00	100.22	263.73	329.66
18	182.79	9.47	0.00	0.00	0.00
19	113.19	0.00	60.13	158.24	197.80
20	256.69	83.37	0.00	0.00	0.00
21	202.45	29.13	0.00	0.00	0.00
22	219.59	46.27	0.00	0.00	0.00
23	76.83	0.00	96.49	253.93	317.42
24	83.64	0.00	89.68	235.99	294.99
25	164.31	0.00	9.01	23.71	29.64
26	237.13	63.81	0.00	0.00	0.00
27	184.77	11.45	0.00	0.00	0.00
28	203.95	30.63	0.00	0.00	0.00
29	180.40	7.08	0.00	0.00	0.00
30	69.78	0.00	103.54	272.47	340.58

Elaboración propia (2018).

**Tabla 9.** Requerimiento de MAP.

Punto	Cantidad de P en el suelo (kg ha <sup>-1</sup> )	Exceso (kg ha <sup>-1</sup> )	Déficit (kg ha <sup>-1</sup> )	fertilizante requerido MAP (kg ha <sup>-1</sup> )	Cantidad de fertilizante requerido con una eficiencia de fertilización 80% (kg ha <sup>-1</sup> )
1	53.89	19.58	0.00	0.00	0.00
2	28.15	0.00	6.16	22.81	28.51
3	83.99	49.68	0.00	0.00	0.00
4	31.25	0.00	3.06	11.33	14.17
5	56.58	22.27	0.00	0.00	0.00
6	32.30	0.00	2.01	7.45	9.32
7	43.58	9.27	0.00	0.00	0.00
8	112.14	77.83	0.00	0.00	0.00
9	48.11	13.80	0.00	0.00	0.00
10	32.46	0.00	1.85	6.85	8.56
11	42.08	7.77	0.00	0.00	0.00
12	33.27	0.00	1.04	3.85	4.81
13	31.54	0.00	2.77	10.27	12.83
14	37.26	2.95	0.00	0.00	0.00
15	36.26	1.95	0.00	0.00	0.00
16	28.02	0.00	6.29	23.31	29.14
17	36.61	2.30	0.00	0.00	0.00
18	35.20	0.89	0.00	0.00	0.00
19	37.19	2.88	0.00	0.00	0.00
20	21.42	0.00	12.89	47.73	59.67
21	115.85	81.54	0.00	0.00	0.00
22	58.41	24.10	0.00	0.00	0.00
23	38.47	4.16	0.00	0.00	0.00
24	41.88	7.57	0.00	0.00	0.00
25	32.57	0.00	1.74	6.45	8.07
26	70.50	36.19	0.00	0.00	0.00
27	30.25	0.00	4.06	15.05	18.81
28	25.53	0.00	8.78	32.52	40.65
29	41.69	7.38	0.00	0.00	0.00
30	24.46	0.00	9.85	36.48	45.60

Elaboración propia (2018).

**Tabla 10.** Requerimiento de urea 2.

<b>Punto</b>	<b>Cantidad de N en suelo (kg ha<sup>-1</sup>)</b>	<b>Déficit (kg ha<sup>-1</sup>)</b>	<b>Cantidad requerida de N con 80 % de eficiencia (kg ha<sup>-1</sup>)</b>	<b>N aportado KNO<sub>3</sub> (kg ha<sup>-1</sup>)</b>	<b>N aportado MAP (kg ha<sup>-1</sup>)</b>	<b>N requerido (kg ha<sup>-1</sup>)</b>	<b>Cantidad de fertilizante requerido (kg ha<sup>-1</sup>)</b>
1	41.25	148.89	186.11	0.49	0.0	185.63	398.34
2	38.03	152.11	190.14	0.0	3.47	186.67	400.57
3	29.09	161.05	201.31	0.0	0.0	201.31	431.99
4	74.54	115.60	144.50	20.74	1.72	122.03	261.88
5	58.26	131.88	164.85	0.0	0.0	164.85	353.75
6	66.11	124.03	155.04	2.40	1.13	151.50	325.11
7	45.18	144.96	181.20	34.04	0.0	147.16	315.78
8	64.73	125.41	156.76	0.0	0.0	156.76	336.40
9	51.35	138.79	173.49	0.0	0.0	173.49	372.29
10	44.76	145.38	181.72	42.43	1.04	138.25	296.67
11	45.51	144.63	180.78	26.21	0.0	154.58	331.71
12	47.21	142.93	178.66	32.24	0.59	145.83	312.95
13	29.74	160.40	200.50	0.0	1.56	198.94	426.91
14	72.63	117.51	146.89	25.63	0.0	121.25	260.20
15	76.04	114.10	142.62	18.37	0.0	124.25	266.64
16	80.63	109.51	136.89	0.0	3.55	133.34	286.14
17	38.38	151.76	189.70	42.86	0.0	146.85	315.12
18	84.36	105.78	132.23	0.0	0.0	132.23	283.75
19	49.52	140.62	175.78	25.71	0.0	150.06	322.03
20	81.99	108.15	135.18	0.0	7.26	127.92	274.51
21	72.30	117.84	147.30	0.0	0.0	147.30	316.09
22	82.34	107.80	134.75	0.0	0.0	134.75	289.15
23	38.41	151.73	189.66	41.26	0.0	148.40	318.45
24	50.53	139.61	174.51	38.35	0.0	136.16	292.19
25	109.54	80.60	100.76	3.85	0.98	95.92	205.84
26	75.95	114.19	142.74	0.0	0.0	142.74	306.30
27	72.84	117.30	146.63	0.0	2.29	144.34	309.74
28	69.68	120.46	150.58	0.0	4.95	145.63	312.51
29	62.44	127.70	159.62	0.0	0.0	159.62	342.54
30	52.33	137.81	172.26	44.28	5.55	122.43	262.73

Elaboración propia (2018).

### **6.3.3. Fertilización convencional**

La fertilización convencional para maíz en valles altos maneja dosis de 120-60-00 y 120-60-30, basados en estas dosis el costo en fertilizantes, usando los mismos fertilizantes convencionales, son los siguientes:

Para la dosis 120-60-00, con la superficie de 1500m<sup>2</sup> aplicando de forma homogénea, se requieren 33.33 kg de MAP con un costo de \$293.6, así como 29.92 kg de urea con un costo de \$203.46, dando en total \$500.13; el costo por hectárea asciende a los \$3334.2

Usando la dosis 120-60-30, con la misma superficie de 1500 m<sup>2</sup> y aplicación homogénea de fertilizantes se requieren; 31.91 kg de triple 17 con un costo de \$267.45, 24.56 kg de MAP con un costo de \$218.61 y 32.21 kg de urea con un costo de \$219.61, dando un total de \$705.10; el costo por hectárea asciende a los \$4700.60.

## 7. CONCLUSIONES

Las propiedades físicas y químicas se determinaron analíticamente; con los resultados obtenidos fue posible identificar las variaciones espaciales por cada punto de muestreo.

Con los resultados obtenidos del análisis de las propiedades físicas y químicas de cada punto de muestreo, fue posible identificar a través de los diferentes mapas, las variaciones espaciales de la zona de estudio.

Las propiedades del suelo analizadas que presentaron mayor variabilidad fueron la conductividad eléctrica, el fósforo ( $\text{PO}_4^{-3}$ ) y el nitrógeno ( $\text{NH}_4^+$ ) los coeficientes de variación fueron de 54.1, 52.0 y 41.34 respectivamente, esto indica mayor dispersión con respecto a la media aritmética es alto. Las propiedades químicas con menor variabilidad fueron el pH real y potencial y el contenido de calcio ( $\text{Ca}^+$ ), con coeficientes de variación de 3.06, 6.25 y 7.00, respectivamente.

La variabilidad de las propiedades físicas fue menor en la parcela; la densidad real tuvo un coeficiente de variación de 2.46 y el porcentaje de arcilla tuvo un valor de 14.96; esto indica que estas propiedades tienden a mantener un comportamiento similar en el área.

Los mapas de variabilidad obtenidos permitieron determinar las necesidades de fertilización específicas de cada área de muestreo evaluado. La fertilización convencional, es decir con aplicación homogénea, con la dosis 120N – 60P – 30K tiene un costo de \$ 4700; mientras que, con el manejo sitio-específico con la propuesta de fertilización 1 el costo es de \$ 4427.20, lo que significa un ahorro de \$272.8 por ha. La propuesta de fertilización 2 representa un 93.41 % del costo de la fertilización convencional, lo que significa un ahorro de \$309.40 por ha.

Integrar los resultados de laboratorio con las prácticas agronómicas permitió elaborar un programa de fertilización que hace más eficiente el uso de los recursos económicos y materiales destinados a la producción; la fertilización que en maíz representa el 20 % de los costos de producción, con el manejo sitio específico se redujo el 18 % en promedio.

Los mapas de variabilidad de las propiedades físicas y químicas del suelo permitieron conocer la condición específica en las que cada una de estas está presente dentro de la

parcela de estudio; a partir de algunos puntos de muestro, el método permitió predecir las características de la totalidad de la parcela. Esta información puede ser utilizada para implementar planes de manejo adecuados a las características del suelo y permite tener información histórica sobre las condiciones de la parcela y su evolución temporal.

El manejo propuesto puede utilizarse en áreas de producción pequeñas; sin embargo, será necesario contar con el análisis de suelo específico para realizar el procedimiento descrito en el presente trabajo.

## 8. REFERENCIAS

- Acevedo, D. C., Álvarez Sanches, M. E., Hernández Acosta, E., Maldonado Torres, R., Pérez Grajales, M., & Castro Nrendis, R. (2008). Variabilidad espacial de propiedades químicas del suelo y su uso en el diseño de experimentos. *Tierra Latinoamericana*, 26(4), 317–324.
- Acosta, R. (2009). El cultivo de Maíz, su origen y su clasificación. El maíz en Cuba. *Cultivos Tropicales*, 30(2), 133–120.
- Arellano Vázquez, J. L., Virgen Vargas, J., & Avila Perches, M. A. (2010). H-66 Híbrido de maíz para los Valles Altos de los Estados de México y Tlaxcala. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 1(2), 252–257.
- Arias Jiménez, A. C. (2007). *suelos tropicales* (1st ed.). San Jose, Costa Rica: Editorial Universidad Estatal a Distancia.
- Bosque Sendra, J. (1997). *Sistemas de información geográfica* (2 Edición). Madrid: Ediciones rialp.
- Boul, S. W., Southard, R. J., Graham, R. C., & McDaniel, P. A. (2003). *Soil genesis and classification* (5th ed.). Iowa: Iowa State Press A Blackwell Publishing.
- Bundy, L. G. (1998). *Corn fertilization*. Wisconsin: University of Wisconsin Cooperative Extension.
- Casas Flores, R. (2011). *El suelo de cultivo y las condiciones climáticas* (1st ed.). España: Ediciones Paraninfo, S.A. Retrieved from <http://www.paraninfo.es/catalogo/9788428332873/uf0001---el-suelo-de-cultivo-y-las-condiciones-climaticas>
- Doerge, T. (1998). Defining management zones for precision farming. *Crop Insights*, 21(8), 1–5.
- ESRI. (2017a). Cómo funciona Kriging. Retrieved from <https://pro.arcgis.com/es/pro-app/tool-reference/spatial-analyst/how-kriging-works.htm>

- ESRI. (2017b). comprender un semivariograma: rango, meseta y nugget. Retrieved from <https://pro.arcgis.com/es/pro-app/help/analysis/geostatistical-analyst/understanding-a-semivariogram-the-range-sill-and-nugget.htm#GUID-1E2580E3-B623-4B4C-80DC-63FE92852267>
- ESRI. (2017c). Introduction to geostatistical Analyst. Retrieved from <https://desktop.arcgis.com/es/arcmap/latest/extensions/geostatistical-analyst/what-is-geostatistics-.htm>
- ESRI. (2017d). Semivariogram and covariance functions. Retrieved from <https://pro.arcgis.com/es/pro-app/help/analysis/geostatistical-analyst/semivariogram-and-covariance-functions.htm#GUID-C114366B-7775-420F-A571-23A5813C81B8>
- ESRI. (2018). Proyección universal transversal de Mercator. Retrieved from <http://desktop.arcgis.com/es/arcmap/10.3/guide-books/map-projections/universal-transverse-mercator.htm>
- FAO. (2013). *El manejo del suelo en la producción de hortalizas con buenas prácticas agrícolas*. Retrieved from <http://www.fao.org/3/a-i3361s.pdf>
- FAO. (2015). *El suelo es un recurso no renovable*. Roma. Retrieved from <http://www.fao.org/3/a-i4373s.pdf>
- FAO. (2017a). FAOSTAT. Retrieved from <http://www.fao.org/faostat/es/#data/QC>
- FAO. (2017b). Propiedades Físicas del Suelo. Retrieved from <http://www.fao.org/soils-portal/soil-survey/propiedades-del-suelo/propiedades-fisicas/es/>
- FAO. (2018). Propiedades Químicas1. Retrieved from <http://www.fao.org/soils-portal/soil-survey/clasificacion-de-suelos/sistemas-numericos/propiedades-quimicas/es/>
- Farming, P., & Components, P. F. (2010). Precision Farming Advances Agricultural Sustainability, (February 2008), 1–5.
- FIRA. (2016). *Panorama Agroalimentario, Maíz 2016*. Retrieved from [https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/200637/Panorama\\_Agroalimentario](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/200637/Panorama_Agroalimentario)

- Foth, H. D. (1990). *Fundamentals of soil Science* (8th ed.). Canada: Jhon Wiley & Sons.
- Goovaerts, P. (1998). Geostatistical tools for characterizing the spatial variability of the microbiological and physic-chemical soil properties. *Biology and Fertility of the Soil*, 27(4), 315–334.
- Henriquez, C., Killorn, R., Bertsch, Fl., & Sancho, F. (2005). La geoestadística en el estudio de la variación espacial de la fertilidad del suelo mediante el uso del interpolador Kriging. *Agronomía Costarricense*, 29(2), 73–81.
- Horowitz, A. J., & Walling, D. E. (2005). Sediment Budgets. *International Association of Hydrological Sciences IAHS Press*, 2(292), 262–270.
- INEGI. (2009). Prontuario de información geográfica municipal de los Estados Unidos Mexicanos Ahuazotepec , Puebla.
- Johnston, K., Ver Hoef, J. M., Krivaruchko, K., & Lucas, N. (2001). *Using ArcGIS geostatistical analyst*. Ney York: ESRI. Retrieved from [http://dusk2.geo.orst.edu/gis/geostat\\_analyst.pdf](http://dusk2.geo.orst.edu/gis/geostat_analyst.pdf)
- Kass, D. C. L. (1998). *Fertilidad de suelos* (1st ed.). San José, Costa Rica: EUNED.
- Kazantzev, T. (2017). *Soil Science: Principales and Technology*. New York: Arcler Press.
- Kravchenko, A. N. (2003). influence of spatial structure on accuracy of interpolation methods. *Soil Sci. Soc*, 67, 1564–1571.
- Krishna, K. R. (2013). *Precision Farming: soil fertility and productivity aspects*. Warenton, NJ, USA: Apple Academic Press Inc.
- Lacasta, C., Meco, R., & Maire, N. (2005). Evolución de las producciones y de los parámetros químicos y bioquímicos del suelo, en un agroecosistema de cereales sometido a diferentes manejos de suelo durante 21 años. *Congreso Internacional Sobre Agricultura de Conservación.*, 429–436.

- Leiva, F. R. (2006). aproximación metodológica al manejo por sitio específico del suelo para la sostenibilidad y competitividad de cultivos transitorios en Colombia. *Suelos Ecuat*, 36(2), 49–56.
- Martínez Vargas, A., & Ramírez García, J. (2005). Desarrollo actual de la geoestadística en el mundo. *Minería y Geología*, 21(4), 21.
- Matsuko, Y., Vigouroux, Y., Goodman, M. M., Sances, J., Buckler, E., & Coebley, J. (2002). A single domestication for maize shown by multilocus microsatellite genotyping. *Proc. Nat. Acad. Sci.*, 99, 6008–6084.
- Mengel, K., Kirby, E. A., Kosegarten, H., & Appel, T. (2001). *Principales of Plants Nutrition* (5th ed.). Springer-Science+Business Media.
- Moral García, F. J. (2004). Aplicación de la Geoestadística en la ciencias ambientales. *Ecosistemas, Revista Científica de Ecología y Medio Ambiente*, 13, 12. Retrieved from [url:0Ahttp://www.aeet.org/ecosistemas/041/revision3.htm](http://www.aeet.org/ecosistemas/041/revision3.htm)
- Moreno Jimenez, A. (2008). *Sistemas y análisis de la información geográfica, Manual de aprendizaje con ArcGIS*. México: Alfaomega Grupo Editor.
- Obando, F., Villegas, A., Betancurt, J., & Echeverri, L. (2006). Variabilidad espacial de propiedades químicas y físicas en un Typic Udivitrands arenoso de la región andina central colombiana. *Rev Fac Nat Agr Medellín*, 59(1), 3217–3235.
- Ortega, R., Péres, C., Flores, L., Claret, M., Dallmeyer, A., Schlosser, J., & He. (1999). *Agricultura de precisión: introducción al Manejo Sitio-Específico*. (R. Ortega & L. Flores, Eds.). INIA.
- Paz-González, A., Viera, S., & Taboada, M. (2000). The effect of cultivation on the spatial variability of selected properties of an umbric horizon. *Geoderma*, 97, 273–292.
- Plaster, E. (1992). *Soil science & management* (2nd ed.). USA: Delmar Publishers Inc.
- Porta, J., López-Acevedo, M., & M. Poch, R. (2014). *Edafología uso y protección de suelos* (3rd ed.). Madrid: Ediciones Mundi Prensa.

- Rodrigues, J., González, A. M., Leiva, F. R., & Guerrero, L. (2008). Fertilización por sitio específico en un cultivo de maíz (*Zea mays* L.) en la Sabana de Bogotá. *Agronomía Colombiana*, 26(2), 308–321.
- SAGARPA. (2015a). *Agenda Técnica Agrícola de Puebla* (2nd ed.). Mexico, D.F.: Secretaría de Agricultura, Ganadería, DEsarrollo rural, Pesca y Alimentación.
- SAGARPA. (2015b). Generalidades del cultivo: maíz. Retrieved from [http://snics.sagarpa.gob.mx/rfaa/Paginas/Basicos\\_e\\_Industriales/Maiz/Generalidades\\_Cultivo.aspx](http://snics.sagarpa.gob.mx/rfaa/Paginas/Basicos_e_Industriales/Maiz/Generalidades_Cultivo.aspx)
- Schulze, D. G. (1993). significance of organic matter in determining soil colors. *Soil Science Society of America, soil color*(Madison, WI), 71–90.
- SIAP. (2018). anuario estadístico de la producción agrícola. Retrieved from <https://nube.siap.gob.mx/cierreagricola/>
- Silva, J., de Assis Júnior, R. N., Rocha, S. S., & Camacho, J. H. (2011). Spatial variability of an Alfisol cultivated with sugarcane. *Ciencia e Investigación Agraria*, 38(1), 155–164.
- Silva Martins, A. L., Gomes de Moura, E., & Camacho Tamayo, J. H. (2010). Variabilidad espacial de la infiltración y su relación con algunas propiedades físicas. *Ingeniería e Investigación*, 30(2), 116–123.
- Snyder, D. . (1996). *An economin analysis of Variable nitrogen management. Proceedings of the Third International Conference on Precision Agriculture*. Minneapolis, Minnesota, USA.
- Soil Sciencie Society of America, . (2008). *Glosary of Soil Science Terms*. Madison, WI: Soil Science Society of America.
- Summer, M. (2000). *Handbook of soil science* (1st ed.). CRC PRESS LLC.
- Thompson, L. M., & Troeh, F. R. (2004). *Los suelos y su fertilidad* (4th ed.). Barcelona: Editorial REVERTÉ, S. A.

- Valbuena, C. A., Martínez, L. J., & Giraldo, R. (2008). Variabilidad espacial del suelo y su relación con el rendimiento de mango (*Mangifera indica* L.). *Rev. Bras. Frutic*, 30(4), 1146–1151.
- Valencia Islas, C. Elena. (2016). *Manual de prácticas del laboratorio de Edafología*. FES Cuautitlán, UNAM.
- Valencia Islas, C. Elena, & Hernández Beltrán, A. (2002). *Muestreo de suelos, preparación de muestras y guía de campo* (1st ed.). México, D.F.: Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán, Universidad Nacional Autónoma de México.
- Vrindts, E., Reyneiers, M., Darius, P., Frankinet, M., Hanquet, B., Destain, M., & Baerdemaeker, J. (2003). *analysis of spatial soil, crop and yield data in a winter wheat field. Annual International Meeting*.