

MÁSTER EN
TECNOLOGÍAS
AVANZADAS PARA EL
DESARROLLO
AGROFORESTAL

TRABAJO FIN DE MÁSTER

Estudios de la variabilidad espacial de las
características edafológicas en una región
hortícola



Universidad de Valladolid

Ana Isabel Jiménez Gil



INDICE

1.	Introducción	1
2.	Antecedentes	1
3.	Material y métodos	2
3.1.	Ubicación y descripción general del área de estudio	3
3.2.	Delimitación de las unidades de muestreo de suelos para el análisis de interpolación	5
3.3.	Análisis químico de las muestras de suelos.....	6
3.4.	Análisis estadístico	8
3.4.1.	pH	9
3.4.2.	Conductividad eléctrica: CE.....	12
3.4.3.	Arena	16
3.4.4.	Limo.....	18
3.4.5.	Arcilla.....	20
3.5.	Determinación de la textura	23
4.	Resultados	25
4.1.	Validación cruzada de resultados.....	25
4.2.	Mapas obtenidos.....	27
4.3.	Interpretación agrícola de los resultados.....	29
5.	Conclusiones.....	30
6.	Bibliografía	31
7.	Anexo.....	32



1. INTRODUCCIÓN

En las últimas décadas los sistemas de producción agropecuarios han estado orientados a la obtención de mayores rendimientos. Para conseguirlo, se ha alterado el material genético, factores bióticos y abióticos, y sus relaciones mediante la implementación de diversas tecnologías. Los altos rendimientos están basados en el alto uso de insumos que ha derivado en un alto costo medioambiental según dijo Pingali et al. (1997), lo que según Eswaran et al. (2001) ha conducido a una disminución cercana al 50% en la capacidad productiva de la tierra.

La agricultura de precisión surge por la necesidad de obtener altos rendimientos con el mínimo impacto ambiental y mínimo coste. Para ello se debe aprovechar las condiciones agroecológicas particulares de cada sitio, ya que el manejo uniforme que se hace en la finca ignora la variación espacial presente en los campos de cultivos, lo que resulta en una sobre o infra-aplicación de insumos, generando problemas tanto económicos como ambientales por el ineficiente uso de las prácticas de manejo del cultivo.

Las características edafológicas de una finca implican una composición y naturaleza del suelo que está relacionada con las plantas y el entorno que le rodea. La textura del suelo es una característica poco alterable en el tiempo, por lo que es interesante conocerlo para optimizar el manejo del cultivo.

2. ANTECEDENTES

Desde hace unos años se ha llevado a cabo una serie proyecto cuyo objetivo ha sido la obtención de mapas de las características del suelo. En la literatura citada se pueden encontrar varios de ellos, en los se estudian una gran variedad de variables del suelo. En todos ellos utilizan una metodología común que es la toma de muestras georreferenciadas y el análisis estadístico de *Kriging*.

En España se ha realizado un proyecto de "*Caracterización de los Suelos Agrícolas y Aguas de Riego de la zona hortícola de El Carracillo y su entorno (Segovia)*" hace unos años. Tiene un visor SIG gratuito desde el cual se puede consultar la información de todos los mapas (<http://www.agropecuariosegovia.com>). Las variables de suelo estudiadas fueron las de la textura (elementos gruesos, arena, limo y arcilla), pH, conductividad eléctrica, materia orgánica, carbonatos totales, nitrógeno total, fósforo asimilable, potasio asimilable y la relación C/N.

El Instituto Tecnológico Agrario de Castilla y León (ITACYL) ha realizado el Atlas Agroclimático de Castilla y León (<http://atlas.itacyl.es>), donde se presentan los mapas relativos a las características edafológicas de Castilla y León. También el ITACYL tiene a disposición en la web (<http://suelos.itacyl.es>), información relativa a las características de los suelos de Castilla y León.

Las fases de desarrollo de todos estos proyectos anteriormente mencionados y el de este trabajo, siguen esquema de desarrollo similar. En la figura 1 se observa el esquema de las fases de desarrollo y funcionamiento del *SIG_El_Carracillo*, que tiene la primera parte compartida con todos los proyectos anteriormente mencionados, y es similar al de las web del ITACYL.

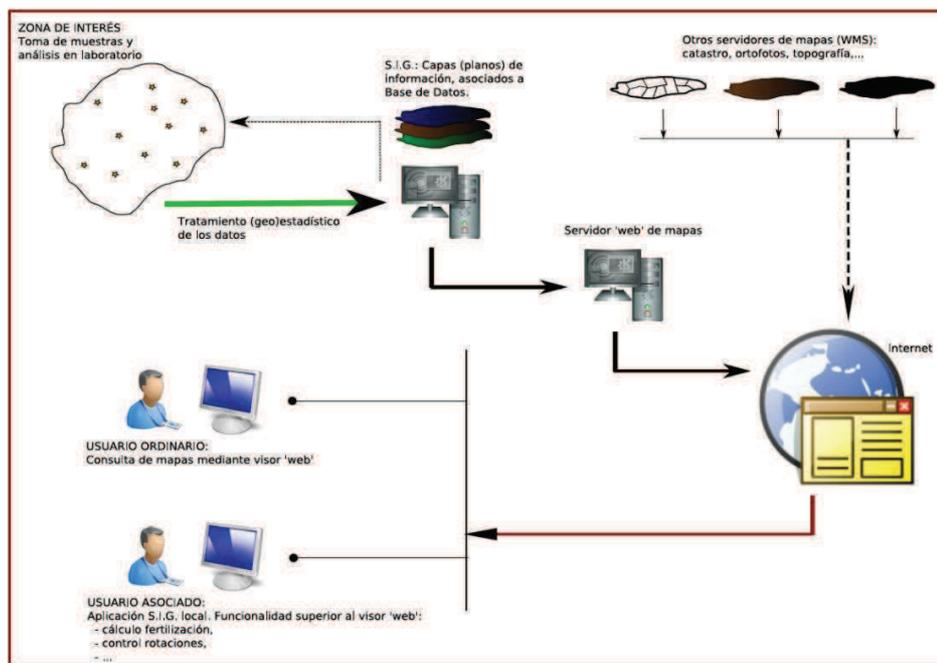


Figura 1: Esquema de las fases de desarrollo y funcionamiento del SIG_El_Carracillo.

Este trabajo se va a centrar exclusivamente en las variables de textura de suelo, pH y conductividad eléctrica de tres fincas colindantes en la localidad de Puelblonuevo Del Guadiana (Badajoz), siguiendo el esquema de la figura 2.

3. MATERIAL Y MÉTODOS

Para la obtención de una serie de mapas continuos con las características edafológicas de la zona de estudio es necesario realizar una toma de datos a nivel de terreno y a continuación procesar la información obtenida. La figura 2 muestra el esquema del procedimiento seguido en este trabajo, donde el recuadro azul recoge el proceso de obtención de datos, el recuadro verde el procesado de esos datos y el rojo los resultados.

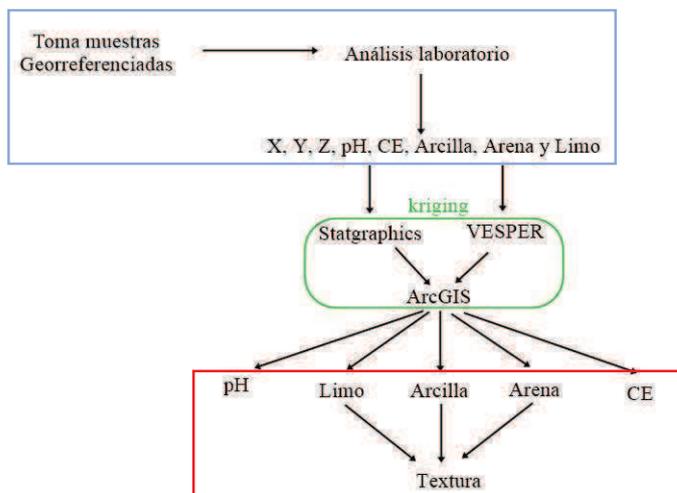


Figura 2: Esquema del procedimiento seguido.

3.1. UBICACIÓN Y DESCRIPCIÓN GENERAL DEL ÁREA DE ESTUDIO

Las fincas donde se va a realizar el estudio pertenecen al municipio español de Pueblonuevo del Guadiana, provincia de Badajoz. (Ver figura 3 y apartado 7 mapa nº1).

La comarca agraria a la que pertenece es Lacara, caracterizada principalmente en que sus tierras son de regadío destacando entre ellas el cultivo del tomate y maíz entre otros como son el arroz, pimiento y los frutales tales como ciruela, pera, nectarina y melocotón.



Figura 3: Localización respecto a la provincia de Badajoz.

Las fincas son propiedad del Centro Tecnológico Alimentario de Extremadura (CTAEX). Dichas tierras tienen una superficie total de 19.5 ha, de las que solo se van a utilizar las 17 ha, las cuales son tierras de labor. Todas pertenecen al municipio 167, masa 680, hoja A, y tienen la siguiente referencia catastral y del SIGPAC:

	Referencia Catastral
Parcela 1	06167A68000351
Parcela 2	06167A68000246
Parcela 3	06167A68000299

El área de estudio se ve influenciada por características propias de las fincas y por características de la zona en la que se encuentra. A continuación se muestran las características relativas a los elementos fincas, la pendiente y el tipo formación de suelo.

En cuando a los elementos y zonas alteradas en la figura 4 se muestra el mapa de la zona de estudio con la ortofoto del PNOA y unas zonas en rojo, que corresponden a varios caminos, un arroyo y un invernadero.

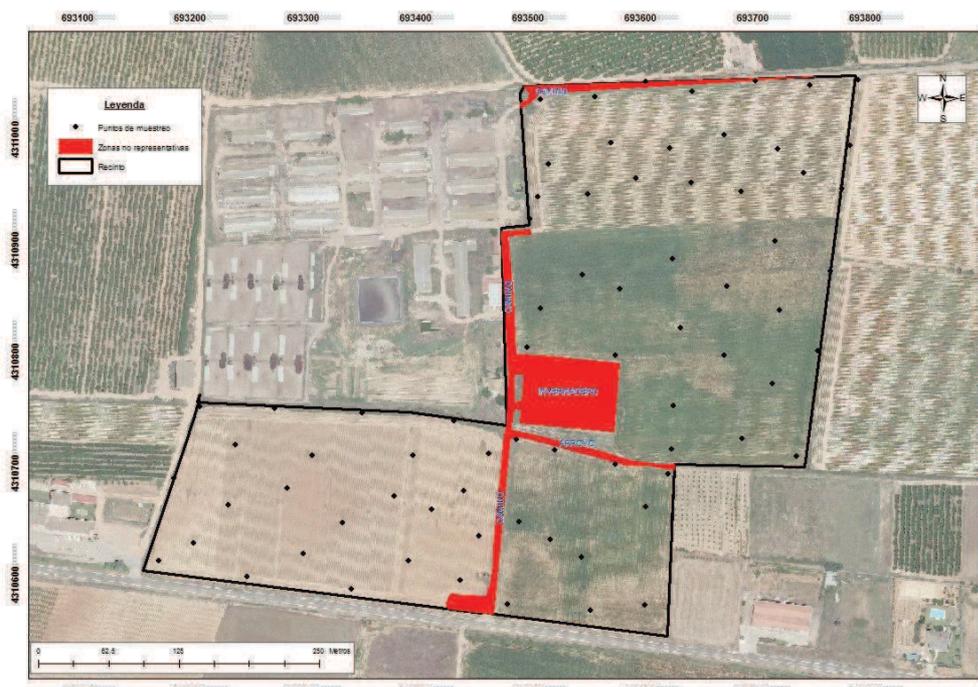


Figura 4: Zonas no representativas del estudio.

Los caminos y el invernadero no se van a ver representados en el estudio. Esto se debe a que han sido alterados con gravas y otros elementos de construcción, que cambian las características edafológicas propias de esa superficie. En el caso de los caminos de los bordes de la zona de estudio, se podría excluir esa superficie, pero en el caso del camino que atraviesa la zona de estudio y del invernadero que está totalmente dentro de la zona de estudio, no se pueden excluir esas superficies porque alterarían los resultados del *kriging* de los puntos cercanos al impedir una correcta distribución espacial.

El área de estudio presenta una topografía homogénea, la altitud de toda la superficie es de 180 m.s.n.m (metros sobre el nivel del mar) con una pendiente máxima del 1% en zonas específicas como se observa en el mapa de la figura 5:

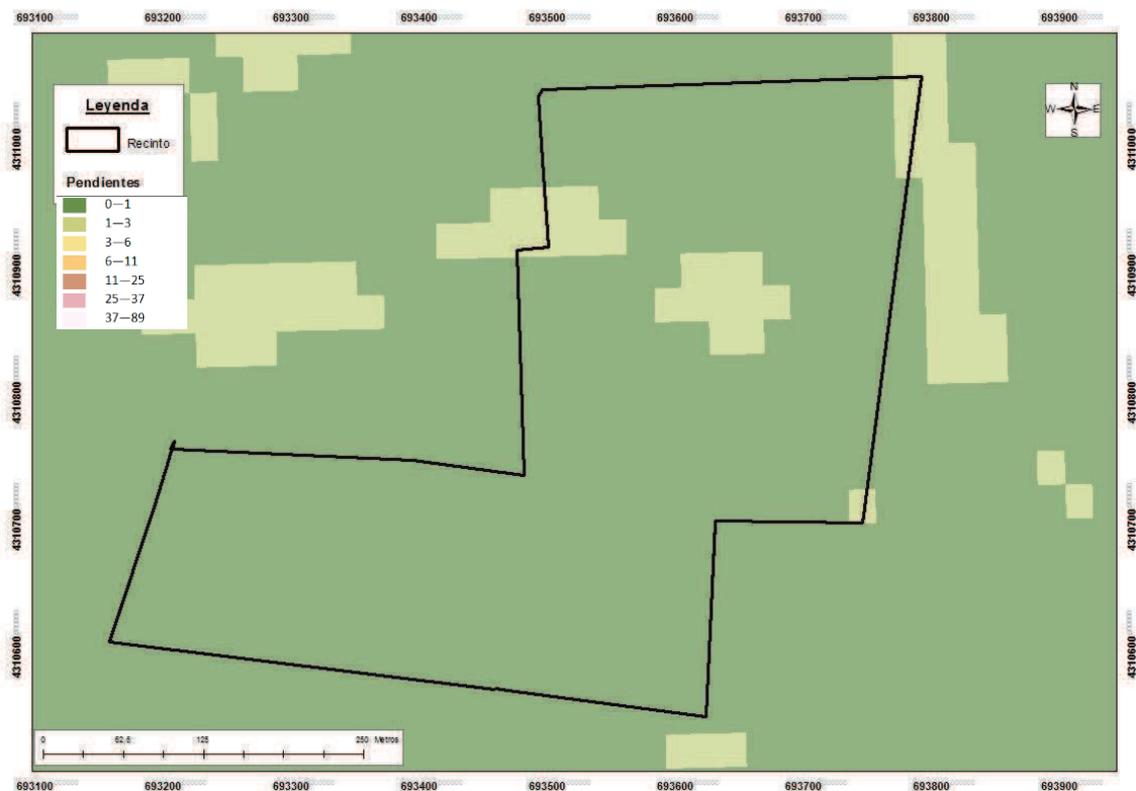


Figura 5: Pendiente en % de la zona de estudio. Servicio WMS del Centro de Información Cartográfica y Territorial de Extremadura. Gobierno de Extremadura

Con respecto a los tipos de suelo, según el *Sistema de clasificación de suelos del USDA (1987)* como se muestra en el mapa de la figura 6; las fincas pertenecen al orden de los *Entisol de suborden Xerorthent y Xerofluvent*. Se trata de suelos jóvenes con escasa o nula evidencia de desarrollo edafogenético de los horizontes; muchos de ellos pueden tener un “epipedon ochirico”, es decir un horizonte superficial de color claro y contenidos bajos de materia orgánica. La causa del escaso desarrollo de los horizontes se puede deber a la joven edad de los suelos o a la origen inerte del material. Dentro de este orden se pueden localizar dos subórdenes: *orthents* y *fluvents*. Los primeros se presentan asociados a superficies de erosión reciente, en posiciones de escarpes o laderas, desarrollados a partir de materiales originarios diversos, en algunos casos blandos y en otros masivos y duros, en los que los procesos de erosión diferencial ejercen una acción más intensa que la de los agentes formadores del suelo. Los segundos se localizan en

posiciones de fondo de valle y en zonas sedimentarias recientes de carácter aluvio-coluvial, relacionados con procesos de acumulación y depósito. En función del régimen de humedad de la zona, se pueden clasificar los suelos siguiendo varios grupos funcionales: en este caso, dado el régimen climático de la comarca, se clasifican de tipo “xeric”, es decir *xerorthent* y *xerofluent*. Este orden tiene una equiparación directa con los *Anthrosoles*, y en parte con los *Regosoles*, *Fluvisoles*, *Arenosoles* y *Gleysoles* del sistema de clasificación de la FAO/UNESCO.

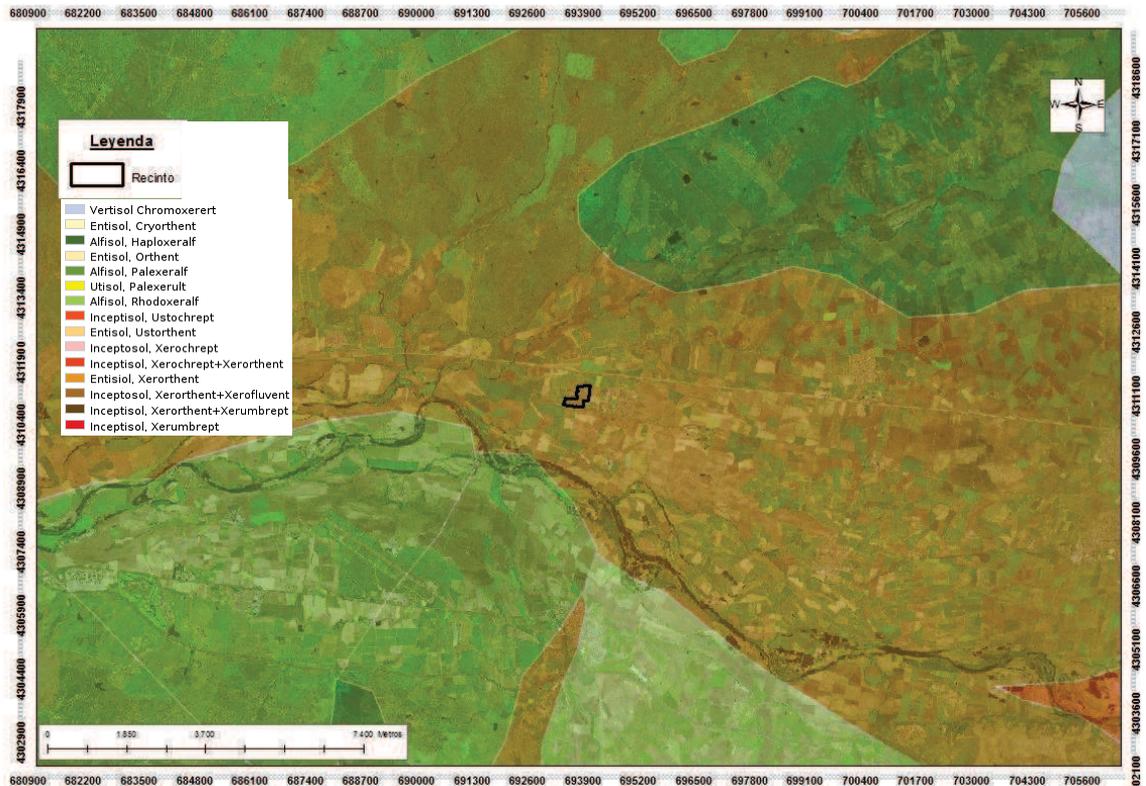


Figura 6: Clasificación de suelos según el Soil Taxonomy 1987 (USDA).

3.2. DELIMITACIÓN DE LAS UNIDADES DE MUESTREO DE SUELOS PARA EL ANÁLISIS DE INTERPOLACIÓN

Para la toma de muestras se partió del mapa del PNOA del municipio de Pueblonuevo de Guadiana y por medio de SIG (Sistemas de Información Geográfica) ArcGIS, se estableció un diseño sistemático para servir de orientación para la toma de muestras en campo. Ese diseño se realizó en base a la plataforma de proyección de cuadrícula UTM (Universal Transverso de Mercator) huso 29. Con ese diseño de referencia y el GPS marca GARMIN, modelo E-trex 10, se tomaron un total de 74 muestras georreferenciadas esparcidas por la superficie de las fincas.



Figura 7: GPS marca GARMIN, modelo E-trex 10.

Las muestras fueron tomadas con una barrena a una profundidad de 20 cm. Da la casualidad que en el momento de la toma de muestras las fincas estaban aradas, por lo que el suelo estaba

homogeneizado y todas las muestras son representativas del perfil del suelo. Con estas muestras analizadas se obtuvieron los datos iniciales con los que se elaboraron los mapas interpolados con las variables arcilla, arena, limo, pH y CE.



Figura 8: Recogida de muestras de suelo. Se observa el material utilizado.

3.3. ANÁLISIS QUÍMICO DE LAS MUESTRAS DE SUELOS

Las muestras de suelo fueron analizadas en el Laboratorio de Edafología Agrícola del Campus de Ingenierías Agrarias de la Universidad de Valladolid.

Para su análisis se dejaron secar a temperatura ambiente durante dos semanas para posteriormente ser tamizadas por un tamiz de 2 mm con el fin de eliminar los elementos gruesos y restos vegetales. Se tamizaron 200 gramos de cada muestra ya que se utilizaron 100 g para determinar la textura y 10 g para determinar el pH y la conductividad eléctrica (CE).



Figura 9: Laboratorio de edafología

Una vez preparadas las muestras se procedió a identificar las partículas minerales (arena, limo, y arcilla) para la textura, que se hizo con el método *Bouyoucos*, y a analizar el pH y la CE de todas las muestras.

La textura de una muestra expresa la proporción en que se encuentran las diferentes partículas minerales constituyentes del suelo, clasificadas atendiendo a su tamaño. Al ser las partículas de forma irregular se adopta el criterio del diámetro equivalente: considerarlas esféricas y de diámetro aquel que corresponde al de una partícula con la misma velocidad de sedimentación en las mismas condiciones. Las partículas se agrupan en tres fracciones principales: arena, limo y arcilla. Según la proporción que exista de cada una de esas tres fracciones, el suelo pertenecerá a una determinada clase textural.

Los métodos analíticos para la determinación de textura, se basan en la *ley de Stokes* que se calcula la velocidad de caída de las partículas en función de su densidad, de su tamaño, de su viscosidad y densidad del líquido.

Para su medición se utiliza el densímetro de Bouyoucos y el siguiente procedimiento:

- Verter en el matraz de erlenmeyer de un litro 100 g de suelo tamizado y 100 mL de Polifosfato de Sodio al 5% (calcón). Agitar durante una hora en un agitador de erlenmeyer motorizado.
- Verter el contenido en una probeta de 1L y enrasar con agua destilada.

- Sumergir el densímetro Bouyoucos y tomar la lectura a los 40 segundos, 4 minutos y 2 horas, midiendo a la vez la temperatura.
- Por cada tanta, hacer uno en blanco.



Figura 10: Laboratorio de edafología. Determinación de la textura.

El protocolo para el pH y la CE se muestra a continuación:

- Añadir 25 mL de agua destilada a una muestra de 10 gr de suelo.
- Agitar durante 30 minutos en una mesa de agitado, y medir el pH.
- Añadir 25 mL de agua destilada, agitar 10 minutos y medir la CE.

Una vez obtenido todos los datos se procede a realizar los cálculos para obtener los porcentajes de arcilla, limo y arena. Para ello se va a utilizar la metodología de Porta J. (2003).

En este procedimiento se calcula para cada lectura la concentración de la suspensión expresada en g/l y los porcentajes acumulados:

$$\text{Expresión 1: } C = L - L'$$

$$\text{Expresión 2: } P = \frac{100 * C}{C_0}$$

En donde:

- C_0 = concentración de la suspensión en g l⁻¹
- L = lectura del densímetro en la suspensión de suelo
- L' = lectura del densímetro en el blanco (1 l de agua en una probeta con 100 ml de calgón)
- P = porcentaje acumulado

Calcular el tamaño correspondiente de las partículas por la siguiente expresión:

$$\text{Expresión 3: } X = \emptyset * t^{-0.5}$$



En donde:

- X = tamaño de las partículas en micras
- t = tiempo de caída en minutos.
- \emptyset = se obtiene de la tabla 1.

Tabla 1: Valores de \emptyset para la determinación de tamaño de las partículas en

L	\emptyset	L	\emptyset	L	\emptyset
-5	50,4				
-4	50,1	11	46,4	26	42,2
-3	49,9	12	46,2	27	41,9
-2	49,6	13	45,9	28	41,6
-1	49,4	14	45,6	29	41,3
0	49,2	15	45,3	30	41,0
1	48,9	16	45,0	31	40,7
2	48,7	17	44,8	32	40,4
3	48,4	18	44,5	33	40,1
4	48,2	19	44,2	34	39,8
5	47,9	20	43,9	35	39,5
6	47,7	21	43,7	36	39,2
7	47,4	22	43,4	37	38,9
8	47,2	23	43,1	38	38,6
9	47,0	24	42,8	39	38,3
10	46,7	25	42,5	40	38,0

El diámetro de las partículas se corrige multiplicando por un factor en función de la temperatura, Tabla 2.

Expresión 4: $X' = X f$

En donde:

- X' = diámetro de las partículas corregidas.
- X = tamaño de las partículas en micras
- f = factor de corrección del diámetro de las partículas para temperaturas diferentes a 30°C.

Tabla 2: Valores de corrección f del diámetro de las partículas para temperaturas diferentes a 30°C.

T°C	f	T°C	f
12	1,24	22	1,09
13	1,23	23	1,08
14	1,21	24	1,07
15	1,19	25	1,05
16	1,18	26	1,04
17	1,16	27	1,03
18	1,14	28	1,02
19	1,13	29	1,01
20	1,12	30	1,00
21	1,10	31	0,99
		32	0,98

Se calculan los porcentajes correspondientes a los diámetros de menos de 0,002 mm (arcillas), entre 0,002 y 0,05 mm (limo) y superior a 0,05 mm (arena).

3.4. ANÁLISIS ESTADÍSTICO

Los resultados de los análisis químicos, correspondientes a las 74 muestras de suelo, fueron sometidos al análisis geoestadístico para las variables de estudio.

Se utilizó los puntos georreferenciados de las muestras con los valores de arena, limo, arcilla, pH y CE para desarrollar un proceso de interpolación espacial de *Kriging ordinario*. Para ello se utilizaron los programas *Statgraphics* y *VESPER* (Variogram Estimation and Spatial Prediction with Error) para conocer si la distribución de cada variable se comporta de forma normal, y así obtener los parámetros del variograma que mejor se ajustan y correlaciona espacialmente.

El variograma o semivariograma es la herramienta básica del método *Kriging*, y se utiliza para modelar la correlación espacial entre observaciones. Se define como una herramienta que permite analizar el comportamiento espacial de una variable sobre un área definida, obteniendo como resultado la influencia de los datos a diferentes distancias. La variación espacial definida por el variograma se utiliza para estimar los valores de los sitios que no se muestrearon.

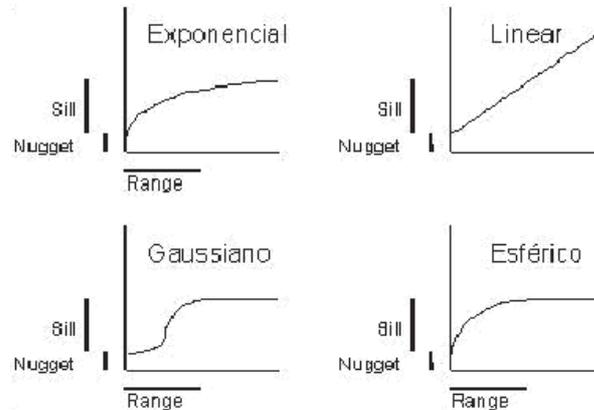


Figura 11: Modelos de variograma más comunes.

Posteriormente, con los parámetros geoestadísticos obtenidos, se interpolan los datos por medio del método *Kriging ordinario* a través del programa *ArcGIS* (versión 10), con la extensión *Spatial Analysis*, y con el resultado de una superficie continua de la variable interpolada.

El *Kriging* es un método geoestadístico que cuantifica la estructura espacial de los datos y su autocorrelación, mediante variogramas para realizar las predicciones correspondientes. La interpolación con el método *Kriging ordinario* permite convertir los datos de la variable de estudio (en este caso arena, limo, arcilla, pH y CE) en superficies continuas.

Los parámetros del variograma (figura 12) son C_0 que representa la variación que no puede ser explicada o ruido (nugget), porque ocurre a una distancia menor que el mínimo intervalo de muestreo; C_1 (partial sill) es la varianza con dependencia espacial; C_1+C_0 (sill) representa el rango y A_1 (range) es el alcance de dependencia espacial.

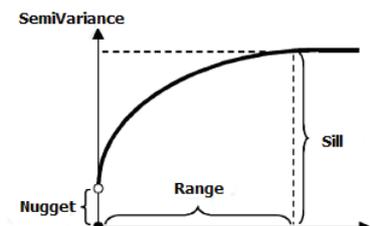


Figura 12: Partes del variograma

A continuación se procede al análisis estadístico de todas las variables de este estudio. El procedimiento es similar para todas, por lo que se va a explicar más detalladamente en el apartado 3.4.1 pH.

3.4.1. pH

El pH del suelo es una medida de la acidez o alcalinidad en los suelos. El pH se define como el logaritmo en base 10 negativo de la actividad de los iones hidronio (H^+ o, más precisamente, H_3O^+ acuoso) en una solución.

El pH del suelo es considerado como una de las principales variables en los suelos, ya que controla muchos procesos químicos que en este tienen lugar. Afecta específicamente la



disponibilidad de los nutrientes de las plantas mediante el control de las formas químicas de los nutrientes.

Para poder utilizar los datos en el proceso de *kriging*, lo primero es cerciorarse de que los datos se ajustan a una distribución normal. Con Statgraphics se puede hacer el análisis de la variable deseada y comprobar si los datos se distribuyen de esta forma. A continuación se muestra la información obtenida de *Statgraphics* introduciendo una tabla con los datos X, Y y pH.

Recuento	74
Promedio	7,87757
Desviación Estándar	0,186193
Coefficiente de Variación	2,36359%
Mínimo	7,39
Máximo	8,36
Rango	0,97
Sesgo Estandarizado	1,64821
Curtosis Estandarizada	0,813951

Figura 13: Resumen estadístico del parámetro pH.

En la figura 13 se encuentra el resumen estadísticos de los datos de pH. La distribución de una variable normal está completamente determinada por dos parámetros, su media y su desviación estándar, que determinan la curva en forma de campana. También hay que fijarse en el sesgo (o simetría) y en la curtosis (coeficiente de asimetría), cuyos rangos tienen que estar entre -2 y +2 para que la variable tenga una distribución normal. De no ser así indicarían desviaciones significativas de la normalidad, lo que tendería a invalidar cualquier prueba estadística con referencia a la desviación estándar. En esta variable los valores de sesgo y curtosis están dentro del rango, por lo que se distribuye la variable de forma normal.

Además Statgraphics realiza la prueba de hipótesis, prueba de signos, prueba de rangos con signo y prueba del chi-cuadrado. En todas estas pruebas se obtiene como resultado que el valor-P en todos los casos es menor que 0.05, por lo que se rechaza la hipótesis nula con un 95.0% de confianza, es decir, admities la hipótesis verdadera admitiendo esos valores como ciertos.

En la figura 14 se observa el histograma de esta variable. Se puede observar una distribución semejante a la normal, por lo se puede trabajar con estos datos brutos.

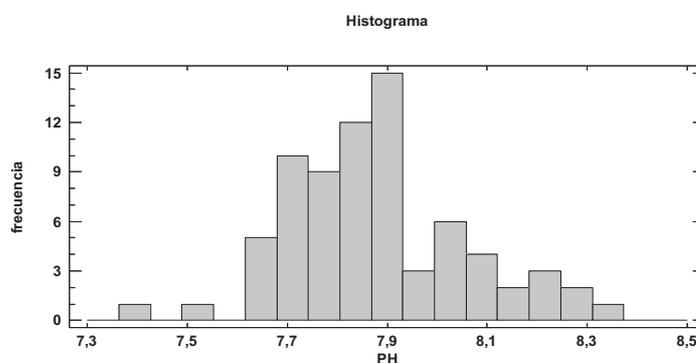


Figura 14: Histograma de los valores del pH.

A continuación, en la figura 15, se muestra el gráfico de probabilidad normal en el que si los puntos (distribución empírica de la muestra de datos) se agrupan en torno a una línea recta (distribución normal) quiere decir que la distribución normal se ajusta bien a los datos empíricos. También se puede comprobar si hay valores atípicos que puedan influir negativamente en el modelo. Se obtiene como resultado que ambas distribuciones son casi idénticas ($W=0.966$), que no hay ningún dato atípico y que los datos se distribuyen de forma normal.

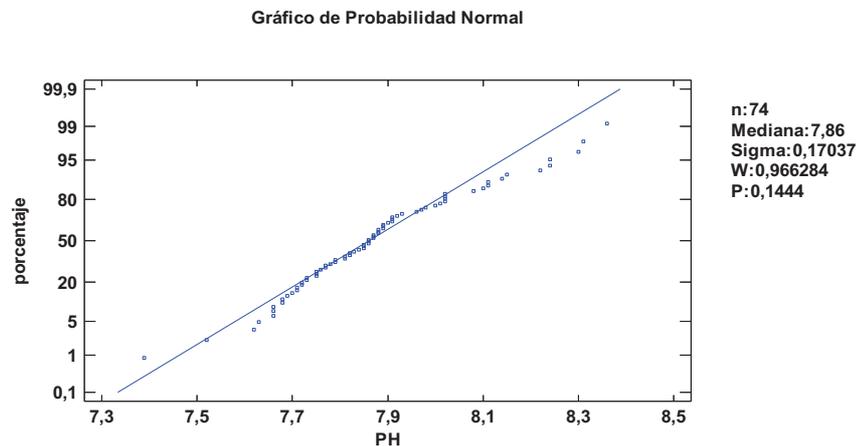


Figura 15: Gráfico de probabilidad normal del pH.

A continuación se utiliza el programa *VESPER 1.6*, para ello se utiliza una tabla de texto con los valores de X, Y y pH.

En la figura 16 se encuentra el variograma de la muestra. En el eje X se muestra la distancia en metros y en el eje Y la variación del parámetro pH. Se observa que con este rango la distribución no explica la variabilidad de las muestras, porque la línea horizontal no se asemeja a la distribución de los puntos a lo largo del eje X.

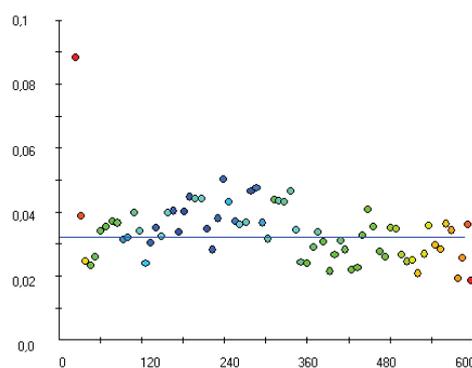


Figura 16: Variograma experimental del pH para todas las distancias posibles.

En la figura 17 se encuentra el variograma experimental en la que se ha elegido una distribución de los datos de *tipo exponencial* y una distancia máxima de *250 metros*. Estas condiciones son las que hacen que haya correlación espacial de los datos en ese rango de distancias. Con la distancia elegida el variograma explica la distribución de los puntos, no siendo representada la distribución a distancias superiores, como ocurría en la figura 8.

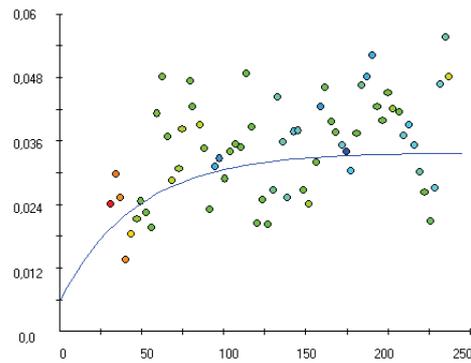


Figura 17: Variograma experimental del pH para todas las distancias explicadas.

Con estos datos y distribución exponencial el valor de la pepita es de 0.005638, el sill es 0.033878 (0.02824 + 0.005638) y el rango es de 46,44. Esta información se puede comparar con la de las otras variables en la tabla 3 del apartado de resultados.

Esta información se puede tratar con la herramienta *Spatial Analysis/ interpolación/ kriging* de la plataforma ArcGIS. El producto obtenido es un ráster con la extensión que abarca los puntos más extremos del plano. El tamaño de pixel elegido ha sido de 5 metros, para que el plano sea útil ya que la maquinaria agrícola suele tener esa anchura. Una vez obtenido el ráster se recorta utilizando la herramienta de arctoolbox “Spatial Analysis/ Extracion/ Extract by mask” y siendo la máscara la capa de recintos.

Para ver el resultado consultar en el Anexo el *Mapa nº 1: Distribución espacial del pH*.

3.4.2. Conductividad eléctrica: CE

La conductividad eléctrica es la capacidad que tiene una sustancia para transmitir o conducir una corriente eléctrica. La CE del suelo es un valor que correlaciona con algunas propiedades del suelo que afectan la productividad de las cosechas, incluyendo textura, capacidad de intercambio catiónico, condiciones de drenaje, contenido de materia orgánica, salinidad, y características del subsuelo.

La capacidad para evaluar las capas superficiales del suelo y subsuelo por medio de mapeo de CE puede resultar útil si las características de dichas capas se hayan asociadas con los patrones de variación del rendimiento de la cosecha, pudiendo ser una guía adecuada para asignar tasas variables de insumos agrícolas, según Doerge T. (1999).

En este estudio se analiza el valor de la CE en la solución de suelo, que está seco, tamizado y con agua destilada. El agua destilada tiene una conductividad eléctrica 0,5 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Por lo que los resultados van a ser muy poco alterados.

La CE del suelo no tiene efecto directo sobre el crecimiento de la cosecha o su rendimiento. La utilidad de los mapas CE proviene de las relaciones que comúnmente se presentan entre la CE y una variedad de otras propiedades del suelo que se encuentran íntimamente asociadas con la productividad de una cosecha. Estas incluyen propiedades tales como capacidad para almacenar agua, profundidad del suelo, capacidad de intercambio catiónico, drenaje del suelo, nivel de materia orgánica, niveles de nutrientes, salinidad y características del subsuelo, como indica Doerge T. (1999).

Con un adecuado control de campo, los valores de CE pueden usarse como medida sustituto para las propiedades que afectan el rendimiento de una cosecha. En general, la correlación entre CE del suelo y rendimiento será mayor cuando el rendimiento está controlado principalmente por la capacidad del suelo para almacenar agua, como indica Doerge T. (1999).

A continuación se muestra la información más relevante obtenida en Statgraphcis que nos indica si la variable se distribuye de forma normal.

Recuento	74
Promedio	261,257
Desviación Estándar	43,1493
Coefficiente de Variación	16,5161%
Mínimo	214,0
Máximo	437,0
Rango	223,0
Sesgo Estandarizado	8,28463
Curtosis Estandarizada	11,738

Figura 18: Resumen estadístico del parámetro CE.

En la figura 18 se encuentra el resumen estadísticos de los datos de CE. La distribución de una variable normal está completamente determinada por dos parámetros, su media y su desviación estándar, que determinan la curva en forma de campana. También hay que fijarse en el sesgo (o simetría) y en la curtosis (coeficiente de asimetría), cuyos rangos están fuera del rango $-2 +2$, por lo que estos datos no se distribuyen de forma normal.

La prueba de hipótesis, prueba de signos, prueba de rangos con signo y prueba del chi-cuadrado dan como resultado que el valor-P en todos los casos es mayor que 0.05, por lo que se acepta la hipótesis nula con un 95.0% de confianza. Se comprueba que los datos no se distribuyen de forma normal.

En la figura 19 se observa el histograma de esta variable. Se puede observar una distribución no semejante a la normal, por lo que no se puede trabajar con estos datos brutos.

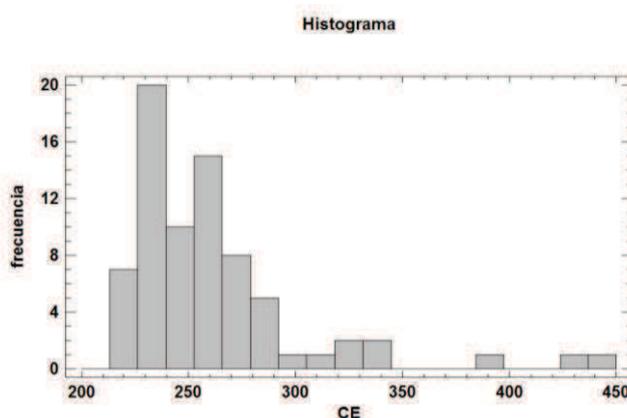


Figura 19: Histograma de los valores de CE.

En la figura 20 se muestra el grafico de probabilidad normal donde se comprueba que la distribución empírica de la muestra de datos (puntos) no se asemeja a la distribución normal (línea recta) y que hay varios valores atípicos.

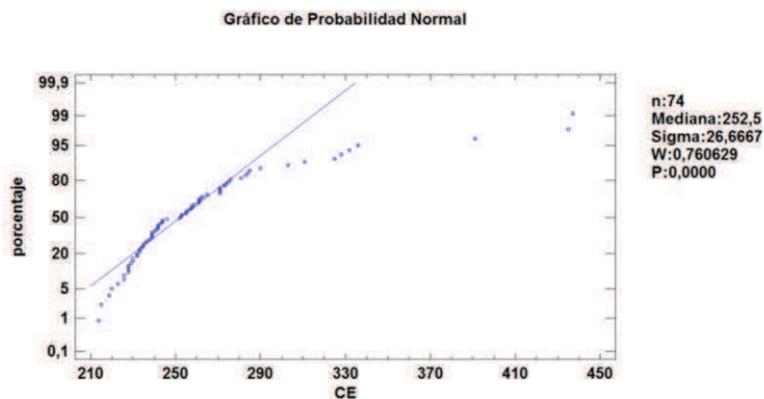


Figura 20: Gráfico de probabilidad normal de CE.

Con esta información se procede a eliminar las filas 66, 36 y 74. También se procede a transformar los datos aplicando el logaritmo neperiano para que la distribución sea normal.

Se repite el análisis estadístico de los datos obteniendo los siguientes resultados:

Recuento	71
Promedio	5,53375
Desviación Estándar	0,104803
Coefficiente de Variación	1,89389%
Mínimo	5,36598
Máximo	5,81711
Rango	0,451135
Sesgo Estandarizado	3,09187
Curtosis Estandarizada	0,912177

Figura 21: Resumen estadístico del parámetro CE transformado por el ln.

En la figura 21 se encuentra el resumen estadísticos de los datos de CE transformado. En este caso los valores de sesgo y curtosis están dentro del rango $-2 +2$, lo que indica que se distribuyen los datos de forma normal. Además las pruebas de hipótesis, prueba de signos, prueba de rangos con signo y prueba del chi-cuadrado dan como resultado que el valor-P para esta prueba es menor que 0.05, por lo que se rechaza la hipótesis nula con un 95.0% de confianza, reafirmando que la variable se distribuye de forma normal.

En la figura 22 se muestra el histograma de la CE transformada. Se observa una distribución semejante a la normal, por lo que se puede trabajar con estos datos.

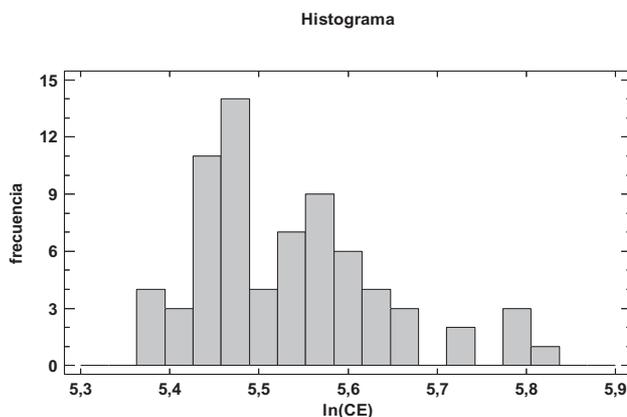


Figura 22: Histograma de los valores de CE transformados.

En la figura 23 se muestra el gráfico de probabilidad normal. En este caso la distribución empírica de la muestra de datos (puntos) se asemeja con la distribución normal (línea recta). Obteniendo un valor de $W=0.92$ que indica empíricamente cuánto se asemejan, y se comprueba que no hay ningún dato atípico por lo que se pueden utilizar los datos.

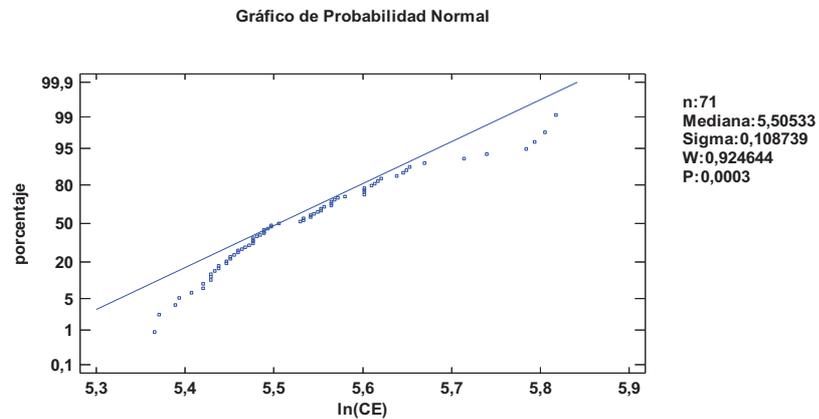


Figura 23: Gráfico de probabilidad normal de CE transformado.

En la figura 24 se encuentra el variograma de la muestra obtenido al utilizar el programa *VESPER 1.6*. En el eje X se muestra la distancia en metros y en el eje Y la variación del parámetro la CE transformada. Se comprueba que con la distancia máxima de separación entre las muestras, la distribución no explica la variabilidad de los datos, porque la línea horizontal no se asemeja a la distribución de los puntos a lo largo del eje X.

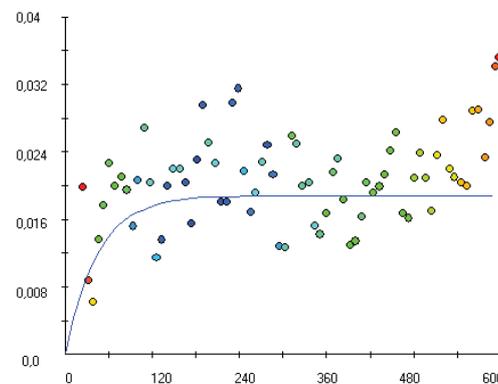


Figura 24: Variograma experimental de la CE transformada para todas las distancias posibles.

En la figura 25 se encuentra el variograma experimental en la que se ha elegido una distribución de los datos de *tipo gaussiana* y una distancia máxima de 240 metros. Estas condiciones son las que hacen que haya correlación espacial de los datos en ese rango de distancias. Con la distancia elegida el variograma explica la distribución de los puntos, no explicando a distancias superiores, como ocurría en la figura 21.

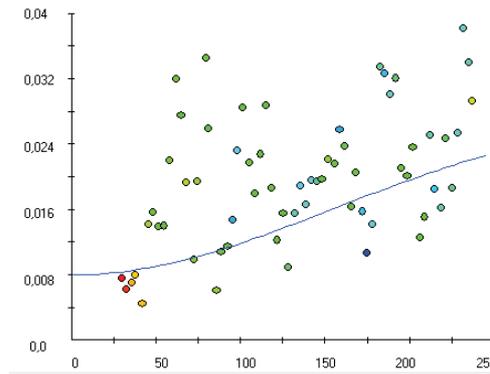


Figura 25: Variograma experimental de la CE transformada

Con estos datos y distribución exponencial el valor de la pepita es de 0,007973, el sill es 0,028373 (0,02040 + 0,007973) y el rango es de 217,9. Esta información se puede comparar con la de las otras variables en la tabla 3 del apartado de resultados.

Esta información se realiza el *kriging* en ArcGIS igual que se explicó en el apartado 3.4.1. pH.

En este caso el producto obtenido es un ráster del logaritmo neperiano de la conductividad eléctrica, por lo que hay que transformarlo a conductividad eléctrica. Para ello se utiliza la herramienta de Raster Calculator. Se calcula la inversa del logaritmo neperiano que en ArcGIS es la expresión “exp(“CE”)”. Una vez obtenido el ráster se recorta utilizando la herramienta de Extract by mask y siendo la máscara la capa de recintos.

Para ver el resultado consultar Anexo el *Mapa nº2: Distribución espacial de CE*.

3.4.3. Arena

La textura define la cantidad de arena, limo y arcilla que existe en el suelo La arena es un conjunto de partículas de rocas disgregadas. En geología se denomina arena al material compuesto de partículas cuyo tamaño varía entre 0,063 y 2 milímetros(mm).

A continuación se muestra la información más relevante obtenida en Statgraphcis que nos indica si la variable se distribuye de forma normal.

Recuento	74
Promedio	0,44661
Desviación Estándar	0,0314069
Coefficiente de Variación	7,0323%
Mínimo	0,37719
Máximo	0,52308
Rango	0,14589
Sesgo Estandarizado	0,483305
Curtosis Estandarizada	-0,687921

Figura 26: Resumen estadístico del parámetro arena.

En la figura 26 se encuentra el resumen estadísticos de los datos de arena, en el que se puede comprobar que los datos se distribuyen de forma normal porque los valores del sesgo y curtosis están dentro del rango de -2 +2. La prueba de hipótesis, prueba de signos, prueba

de rangos con signo y prueba del chi-cuadrado dan como resultado que el valor-P en todos los casos es menor que 0.05, por lo que se rechaza la hipótesis nula con un 95.0% de confianza, reafirmando que la variable se distribuye de forma normal

En la figura 27 se observa el histograma de esta variable. Se puede observar una distribución semejante a la normal, por lo se puede trabajar con estos datos brutos.

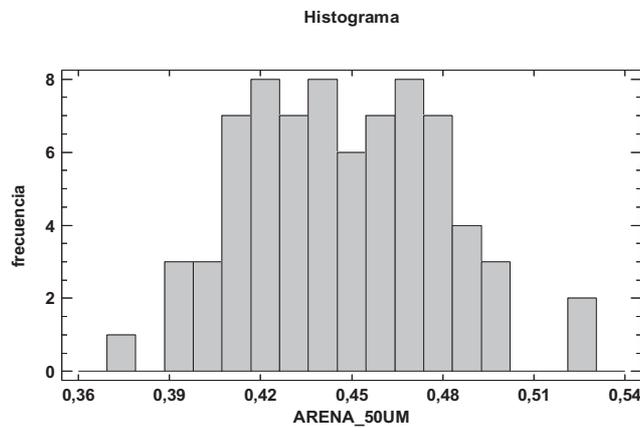


Figura 27: Histograma de los valores de arena.

En la figura 28 se muestra el gráfico de probabilidad normal. En este caso la distribución empírica de la muestra de datos (puntos) se asemeja con la distribución normal (línea recta). Obteniendo un valor de $W=0.98$ que indica empíricamente cuánto se asemejan, y se comprueba que no hay ningún dato atípico por lo que se pueden utilizar los datos.

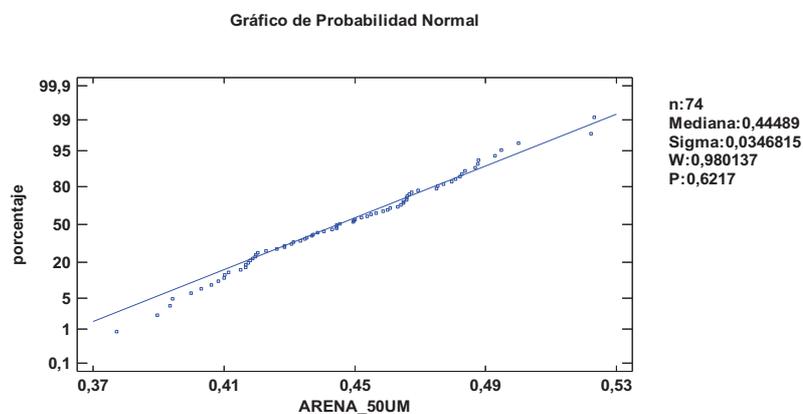


Figura 28: Gráfico de probabilidad normal de arena.

En la figura 29 se encuentra el variograma de la muestra obtenido al utilizar el programa VESPER 1.6. En el eje X se muestra la distancia en metros y en el eje Y la variación del parámetro arena. El variograma es de tipo *gaussiano* y el rango es de 500 metros.

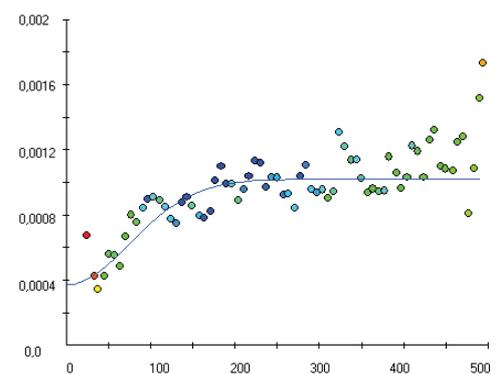


Figura 29: Variograma experimental de arena para todas las distancias explicadas.

Con estos datos y distribución exponencial el valor de la pepita es de 0,0002944, el sill es 0.001006 (0.0002944 +0.0007116) y el rango es de 81,58. Esta información se puede comparar con la de las otras variables en la tabla 3 del apartado de resultados.

Esta información se realiza el *kriging* en ArcGIS siguiendo la metodología seguida en el apartado 3.4.1. pH.

Para ver el resultado consultar Anexo el *Mapa nº3: Distribución espacial de arena.*

3.4.4. Limo

El limo es la segunda partícula más pequeña que conforma el suelo detrás de la arcillase considera como la parte orgánica del suelo por tener nutrientes tales como alcoholes, fenoles, que se dan por el proceso de fermentación. El diámetro de las partículas que varía de 0,002 mm a 0,06 mm.

A continuación se muestra la información más relevante obtenida en Statgraphcis que nos indica si la variable se distribuye de forma normal.

Recuento	74
Promedio	0,34212
Desviación Estándar	0,018192
Coficiente de Variación	5,31743%
Mínimo	0,26316
Máximo	0,40591
Rango	0,14275
Sesgo Estandarizado	-2,67601
Curtosis Estandarizada	11,3642

Figura 30: Resumen estadístico del parámetro Limo.

En La figura 30 se encuentra el resumen estadísticos de los datos de limo, en el que se puede comprobar que los datos se distribuyen de forma normal porque los valores del sesgo y curtosis están dentro del rango de -2 +2. La prueba de hipótesis, prueba de signos, prueba de rangos con signo y prueba del chi-cuadrado dan como resultado que el valor-P en todos los casos es menor que 0.05, por lo que se rechaza la hipótesis nula con un 95.0% de confianza, reafirmando que la variable se distribuye de forma normal

En la figura 31 se muestra el histograma de esta variable. Se puede observar una distribución semejante a la normal, por lo se puede trabajar con estos datos brutos.

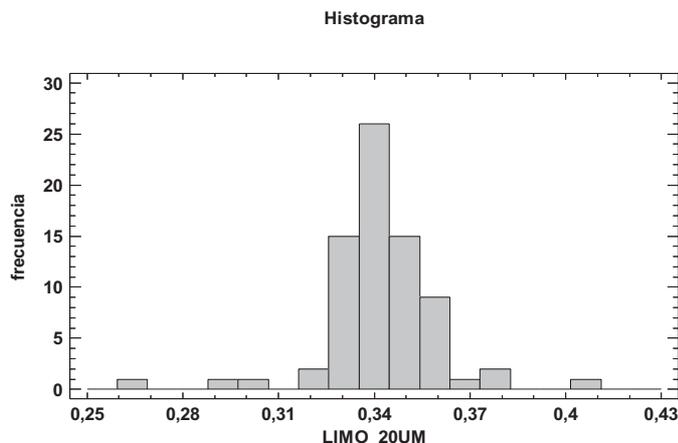


Figura 31: Histograma de los valores del limo.

En la figura 32, se muestra el grafico de probabilidad normal del limo. En este caso la distribución empírica de la muestra de datos (puntos) se asemeja con la distribución normal (línea recta) en la parte central de la gráfica. Se obtiene que $W=0.89$, indicando que se asemejan poco, debiendo eliminar los valores atípicos que son los 6, 8, 39, 4 y 40 de la muestra.

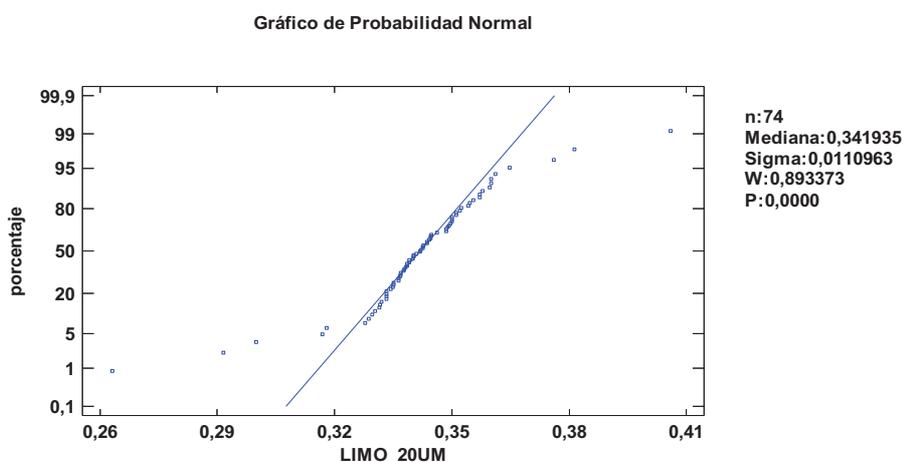


Figura 32: Gráfico de probabilidad normal del limo con todos los valores.

En la figura 33 se encuentra el gráfico de probabilidad normal. Se comprueba que desechados los valores atípicos la distribución de los puntos se asemeja a la distribución normal, con un valor de $W=0.98$.

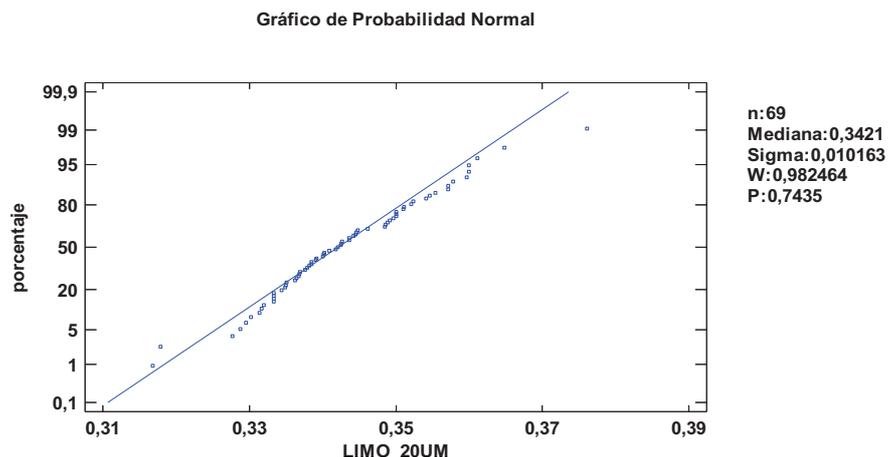


Figura 33: Gráfico de probabilidad normal del limo, filtrando valores atópicos.

En la figura 34 se encuentra el variograma de la muestra obtenido al utilizar el programa VESPER 1.6. Se ha elegido una distribución de los datos de *tipo exponencial* y una distancia máxima de *400 metros* para que haya correlación espacial de los datos. Se comprueba que la distribución explica la variabilidad de las muestras, porque la línea se asemeja a la distribución de los puntos a lo largo del eje X.

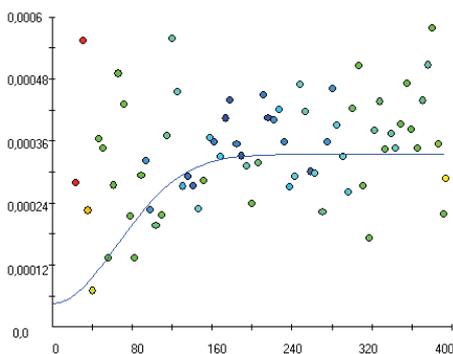


Figura 34: Variograma experimental del limo.

Con estos datos y distribución exponencial el valor de la pepita es de 0,0000452, el sill es 0,0003345 ($0,0000452 + 0,0002893$) y el rango es de 92,48. Esta información se puede comparar con la de las otras variables en la tabla 3 del apartado de resultados.

Esta información se realiza el *kriging* en ArcGIS siguiendo la metodología seguida en el apartado 3.4.1. pH.

Para ver el resultado consultar Anexo el *Mapa n^o4: Distribución espacial del limo*.

3.4.5. Arcilla

Es la partícula más pequeña del suelo. Se considera como un material que compacta el suelo, ayuda a que sus componentes orgánicos en el limo no sean menos densos sino que se adhieran a ella. La arcilla está constituida por agregados de silicatos de aluminio hidratados, procedentes de la descomposición de rocas que

contienen feldespato, como el granito. Presenta diversas coloraciones según las impurezas que contiene, desde el rojo anaranjado hasta el blanco cuando es pura.

A continuación se van a analizar los datos obtenidos en *Statgraphics* introduciendo la tabla con los datos X, Y y contenido de arcilla en tanto por uno.

Recuento	74
Promedio	0,21127
Desviación Estándar	0,0343415
Coefficiente de Variación	16,2548%
Mínimo	0,11439
Máximo	0,35965
Rango	0,24526
Sesgo Estandarizado	2,59434
Curtosis Estandarizada	7,02659

Figura 35: Resumen estadístico del parámetro arcilla.

En la figura 35 se encuentra el resumen estadísticos de los datos de arcilla, en el que se puede comprobar que los datos se distribuyen de forma normal porque los valores del sesgo y curtosis están dentro del rango de $-2 +2$. La prueba de hipótesis, prueba de signos, prueba de rangos con signo y prueba del chi-cuadrado dan como resultado que el valor-P en todos los casos es menor que 0.05, por lo que se rechaza la hipótesis nula con un 95.0% de confianza, reafirmando que la variable se distribuye de forma normal

En la figura 36 se muestra el histograma de esta variable. Se puede observar una distribución semejante a la normal, por lo se puede trabajar con estos datos brutos.

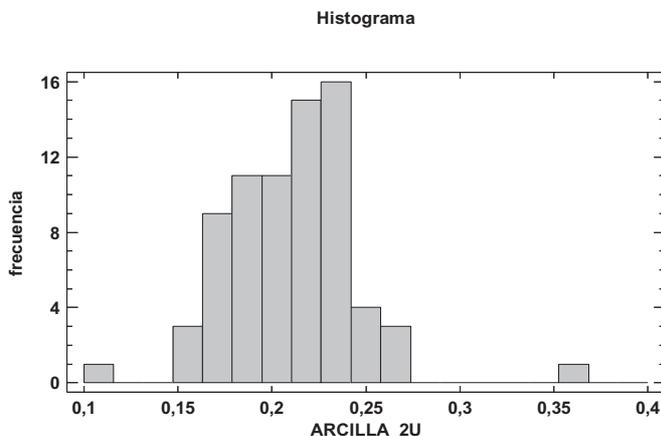


Figura 36: Histograma de los valores de arcilla.

En la figura 37 se muestra el gráfico de probabilidad normal. En este caso la distribución empírica de la muestra de datos (puntos) se asemeja con la distribución normal (línea recta), obteniendo un valor de $W=0.96$. Además se comprueba que datos atípicos que deben ser eliminados.



Gráfico de Probabilidad Normal

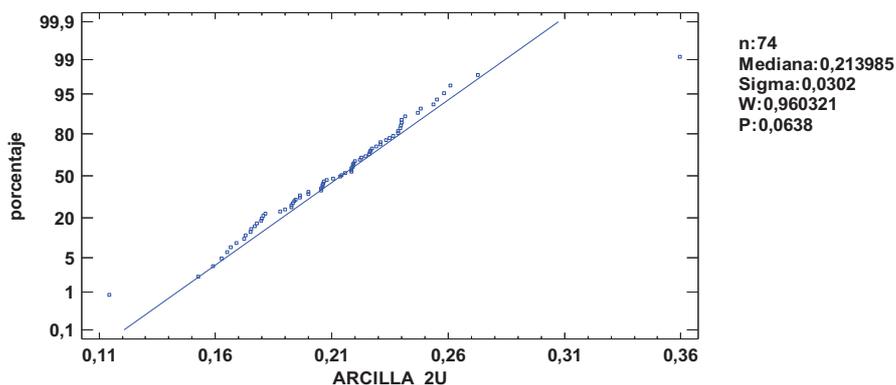


Figura 37: Gráfico de probabilidad normal de arcilla.

En la figura 38 se encuentra el gráfico de probabilidad normal una vez desechados los puntos 6 y 8. Se comprueba que $W=0.97$, siendo similares distribución empírica de la muestra de datos (puntos), con la distribución normal (línea recta).

Gráfico de Probabilidad Normal

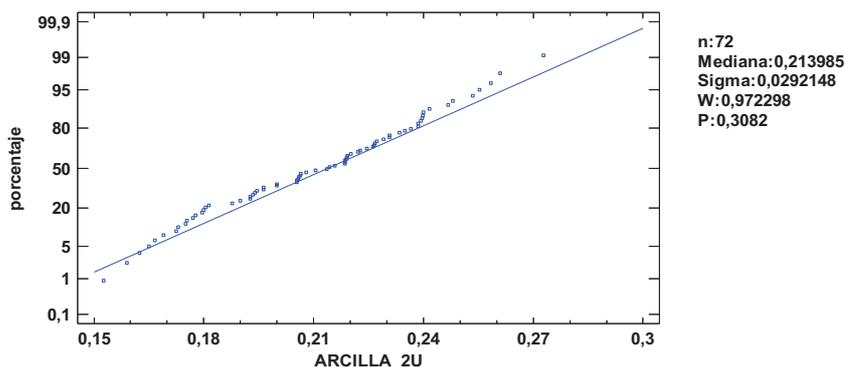


Figura 38: Gráfico de probabilidad normal de arcilla filtrada.

En la figura 39 se encuentra el variograma de la muestra obtenido al utilizar el programa VESPER 1.6. Se ha elegido una distribución de los datos de *tipo exponencial* y una distancia máxima de 300 metros para que haya correlación espacial de los datos. Se comprueba que la distribución explica la variabilidad de las muestras, porque la línea se asemeja a la distribución de los puntos a lo largo del eje X.

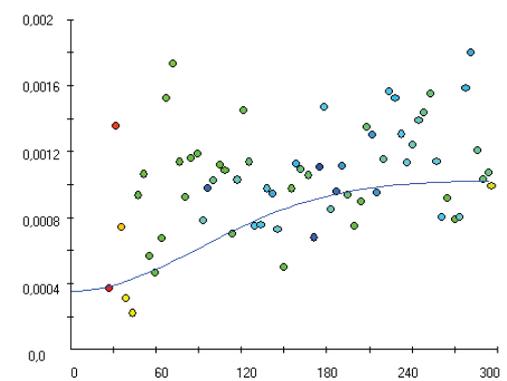


Figura 39: Variograma experimental de arcilla.

Con estos datos y distribución exponencial el valor de la pepita es de 0,0003548, el sill es 0,0010268 (0,0003548+ 0,000672) y el rango es de 129,4. Esta información se puede comparar con la de las otras variables en la tabla 3 del apartado de resultados.

Esta información se realiza el *kriging* en ArcGIS siguiendo la metodología seguida en el apartado 3.4.1. pH.

Para ver el resultado consultar Anexo el *Mapa n°5: Distribución espacial de arcilla*.

3.5. DETERMINACIÓN DE LA TEXTURA

La textura indica el contenido relativo de partículas de diferente tamaño, como la arena, el limo y la arcilla, en el suelo. La textura tiene que ver con la facilidad con que se puede trabajar el suelo, la cantidad de agua y aire que retiene y la velocidad con que el agua penetra en el suelo y lo atraviesa.

Para determinar la textura del lugar de estudio se utilizan las capas ráster de arcilla, arena y limo. Previo a clasificar la textura hay que comprobar y corregir todas las capas para que en todos los puntos de la superficie, la suma de los tres componentes del suelo sea el 100%. Para ello se comprueba sumando las capas de arena, arcilla y limo; observando que el rango de valores oscila entre 1,02 y 0,96. Todos los cálculos se realizan con la herramienta de arctoolbox/ Spatial Analysis/ Map Algebra/ Raster Calculator.

El proceso para realizar la corrección se basa en repartir proporcionalmente a cada capa la diferencia entre la suma de las capas y el valor máximo de 1.

La fórmula utilizada para cada capa en formato ráster de cada elemento es la siguiente:

$$\text{Arena corregida} = \text{arena} - [1 - ((1 * 1) / \Sigma(\text{arena, arcilla y limo})) * \text{arena}$$

$$\text{Limo corregida} = \text{limo} - [1 - ((1 * 1) / \Sigma(\text{arena, arcilla y limo})) * \text{limo}$$

$$\text{Arcilla corregida} = \text{arcilla} - [1 - ((1 * 1) / \Sigma(\text{arena, arcilla y limo})) * \text{arcilla}$$

El procedimiento seguido es el siguiente:

- Suma de las capas de arcilla, limo y arena= “ $\Sigma(\text{arena, arcilla y limo})$ ”



- Porcentaje de error global= “ \sum (arena, arcilla y limo)” es igual a 100%, cómo 100% es igual a “x”. Siendo “x” una incógnita. El resultado es la “X”.
- Porcentaje de error de cada capa: se multiplica “x” por la capa de arena, arcilla y limo. Se obtiene las capas “Error_arcilla”, “Error_arena” y “Error_limo”.
- Aplicación del porcentaje: se resta a cada capa original, la capa con el porcentaje de error. Se obtiene como resultado las capas de arcilla, arena y limo corregidas.

Una vez corregidas las capas de arcilla, arena y limo se procede a calcular la textura. Para ello se ha utilizado la tabla de clasificación internacional de suelos (ISSS), que se encuentra en la figura 37.

CLASE DE SUELO		LÍMITES DE LOS PORCENTAJES DE LAS FRACCIONES DEL SUELO		
TEXTURA	GRUPO*	ARENA	LIMO	ARCILLA
ARENOSO	I	85 - 100	0 - 15	0 - 15
FRANCO ARENOSO	I	65 - 85	0 - 35	0 - 15
FRANCO LIMOSO	II	0 - 55	45 - 100	0 - 15
FRANCO	II	40 - 65	20 - 45	0 - 15
FRANCO ARCILLO LIMOSO	III	0 - 40	45 - 85	15 - 25
FRANCO ARCILLO ARENOSO	II	55 - 85	0 - 20	15 - 25
FRANCO ARCILLOSO	III	30 - 65	20 - 45	15 - 25
ARCILLO LIMOSO	III	0 - 30	45 - 75	25 - 45
ARCILLO ARENOSO	II	55 - 75	0 - 20	25 - 45
ARCILLOSO GRUESO	III	10 - 55	0 - 45	25 - 45
ARCILLOSO FINO	III	0 - 55	0 - 55	45 - 100

* Gimenez Montesinos et al., 1983 (Grupos de suelos en los que se basan las recomendaciones de fertilizantes)

Figura 40: Interpretación de los resultados: Clasificación de suelos (ISSS)

El procedimiento seguido se basa en que los ráster de arcilla, arena y limo tienen un tamaño de celda de 5 metros, por lo que en esa superficie el valor es único. Por lo que el punto central de esa celda es representativo, y tiene coordenadas X e Y de fácil manipulación.

Con la herramienta de ArcToolbox, Conversión Tools/From Raster/ Raster to Point, se consigue una malla de puntos con la misma extensión que el ráster y con información de cada punto. Se realiza para la arcilla, arena y limo, y se introducen los valores de X, Y, arcilla, arena y limo de los 6.728 puntos, en un archivo Excel. Con estos datos ya se puede introducir la función necesaria para calcular que textura tiene cada punto.

En la figura 41 se observa la función “SI” utilizada para la textura arenosa. Se comprueba que los rangos son los de la tabla de clasificación internacional de suelos (ISSS).

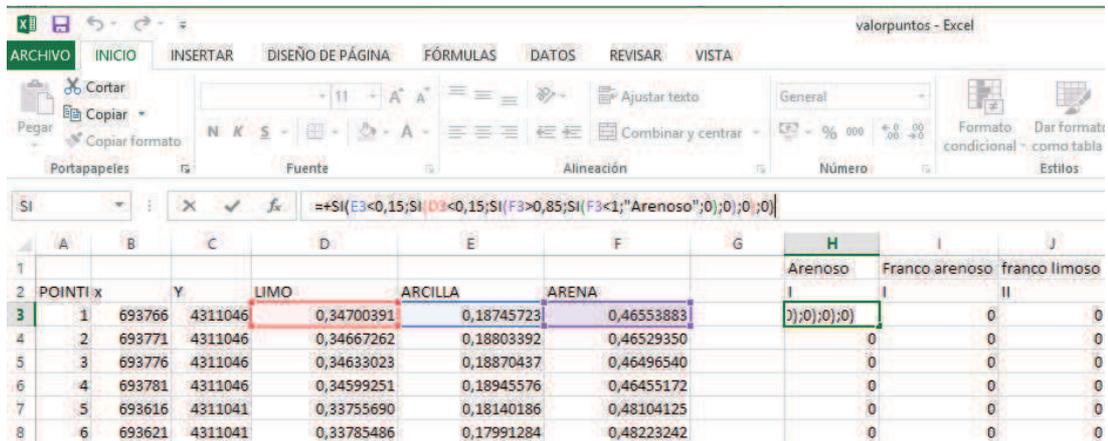


Figura 41: Pantallazo de la hoja Excel donde se realizaron los cálculos de la textura.

El resultado es una serie de puntos que cumplen los porcentajes para ser suelo franco, franco arcilloso y arcilloso grueso. Se importó a ArcGIS los puntos de cada textura y se convirtió a ráster con un tamaño de celda de 5 metros, y se convirtió a vectorial para facilitar el manejo.

Para ver el resultado consultar Anexo el Mapa nº6: Clase textural (ISSS).

4. RESULTADOS

4.1. VALIDACIÓN CRUZADA DE RESULTADOS.

Los resultados encontrados muestran que el área de estudio presentó condiciones de variabilidad en todas las variables estudiadas, que permitieron definir zonas con características diferentes entre sí, y permitieron conocer más detalladamente la cantidad de arcilla, limo arena, pH y CE que existe en ese suelo, pudiendo realizar un manejo de las labores de cultivo más exactas a la realidad del terreno.

En la tabla 3 muestra los parámetros de los modelos ajustados a los variogramas que mejor ajustaran y correlacionaran espacialmente según cada variable estudiada. Recordamos que el parámetro C_0 representa la variación que no puede ser explicada o ruido (nugget), porque ocurre a una distancia menor que el mínimo intervalo de muestreo, C_1 (partial sill) es la varianza con dependencia espacial, C_1+C_0 (sill) representa el rango, A_1 (range) es el alcance de dependencia espacial y R^2 el ajuste a la probabilidad normal.

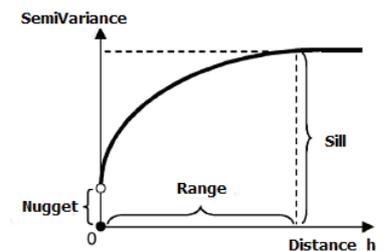


Figura 42: Variograma

Tabla 3. Parámetros geoestadísticos utilizados para los 5 parámetros de suelo.

VARIABLE	MODELO	C0	C1	C1+C0	A1	R ²
pH	Exponencial	0,005638	0,02824	0,033878	46,44	0,96
CE (ln)	Gaussiano	0,007973	0,02040	0,028373	217,9	0,92
ARENA	Gaussiano	0,0002944	0,0007116	0,001006	81,58	0,98
LIMO	Gaussiano	0,0000452	0,0002893	0,0003345	92,48	0,98
ARCILLA	Gaussiano	0,0003548	0,000672	0,0010268	129,4	0,97

Elaboración propia

En particular la variable transformada de CE, presentó el valor de la pepita más grande según los valores del variograma. El mismo cuadro muestra que transformada de CE tuvo el mayor rango, lo que significa que es la característica de menor variabilidad y que mantiene su autocorrelación espacial en mayores distancias, comparativamente con las otras variables del estudio.

En la figura 40 se encuentran los variogramas de todas las variables, en él se puede comparar el tipo de modelo utilizado y comprobar que se corresponde con los valores de la tabla anterior.

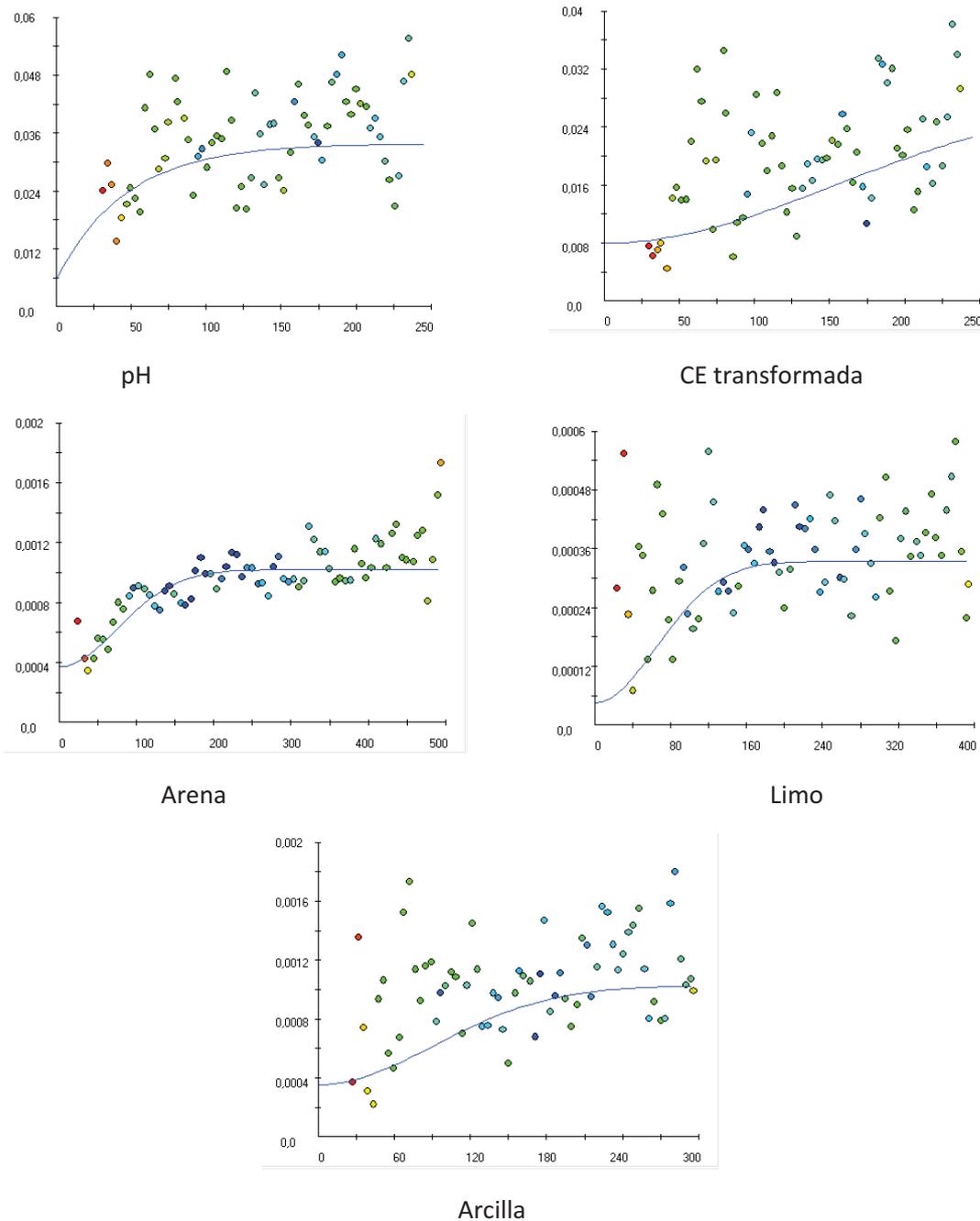


Figura 43: Variograma de todos los parámetros estudiados. pH, CE, arena, limo y arcilla.

En la tabla 4 se compara el rango de valores obtenidos en el laboratorio con los obtenidos en el proceso geoestadístico. Se observa que en general, ha habido una pequeña variación en el valor promedio de cada variable. En cambio en los valores mínimos y máximos ha habido mayor variación, que se debe a que se han desechado algunos valores atípicos que, como se vio en los apartados anteriores, no tenían una distribución normal junto con el resto de valores del parámetro.

Tabla 4. Comparación de los componentes del suelo obtenidos de las determinaciones en laboratorio de los resultados del kriging.

Partículas del suelo	Valor de laboratorio			Valor obtenido desde Kriging		
	Mínimo	Promedio	Máximo	Mínimo	Promedio	Máximo
Arena	37,72%	44,66%	52,31%	39,87%	44,28%	49,86%
Limo	26,31%	34,21%	40,60%	29,69%	34,31%	39,35%
Arcilla	11,34%	21,12%	35,96%	13,72%	21,42%	28,11%

Parámetros	Valor de laboratorio			Valor obtenido desde Kriging		
	Mínimo	Promedio	Máximo	Mínimo	Promedio	Máximo
CE	214	261,26	437	224,20	258,92	237,839
LN(CE)	5,37	5,53	5,82	5,41	5,55	5,79
pH	7,39	7,87	8,36	7,49	7,88	8,27

Elaboración propia

4.2. MAPAS OBTENIDOS.

Los mapas 1, 2, 3, 4 y 5 son los mapas obtenidos en este trabajo. Corresponden a los mapas de variación espacial del pH, CE, arena, limo y arcilla. También se encuentran en el anexo, donde se pueden consultar.

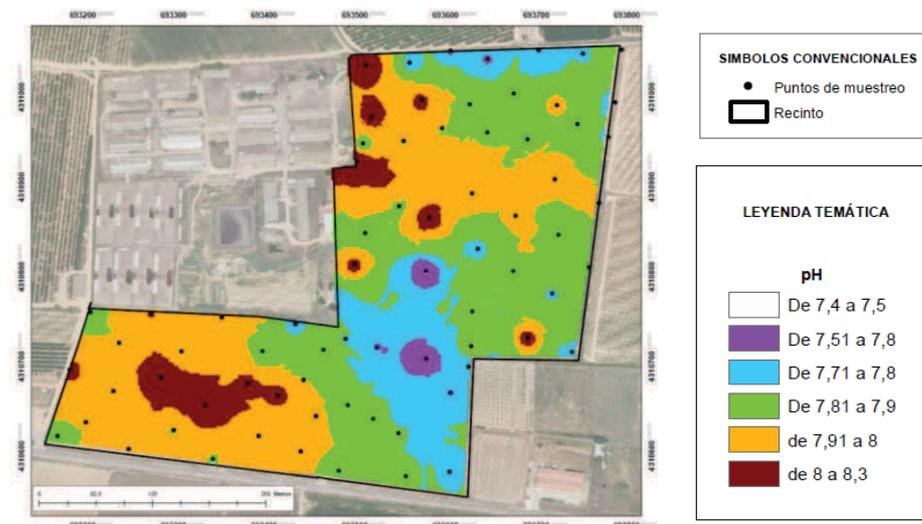


Figura 44: Mapa nº 1, distribución espacial del pH y leyenda.

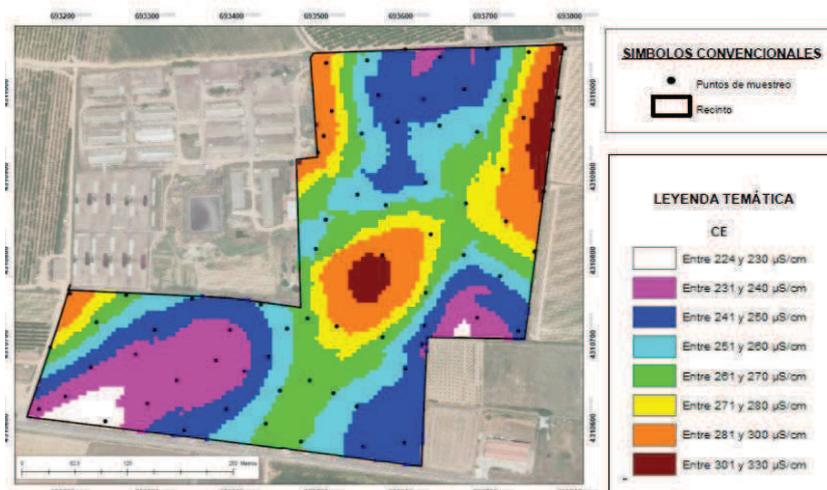


Figura 45: Mapa nº 2 distribución espacial del CE y leyenda.

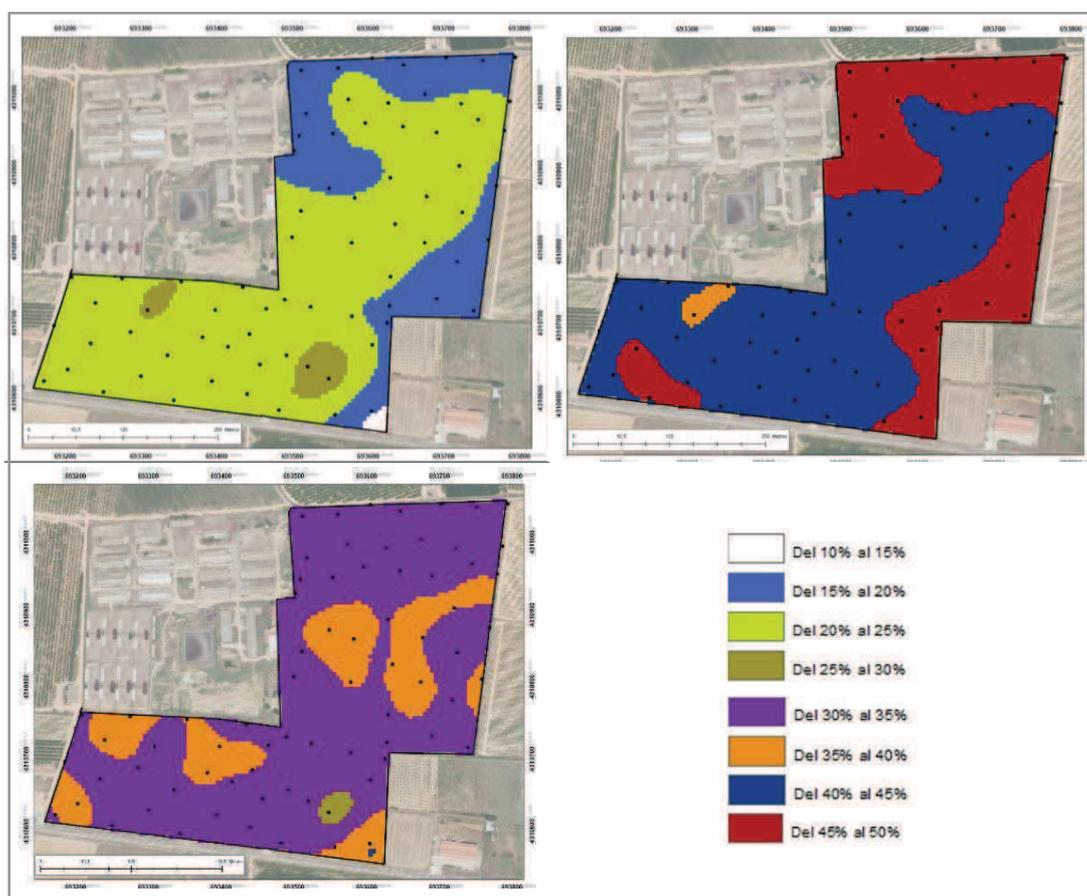


Figura 46: Mapas nº 3, 4 y 5. Distribución espacial de la arena (arriba izquierda), limo (arriba derecha), y arcilla (abajo izquierda), con la clasificación temática.

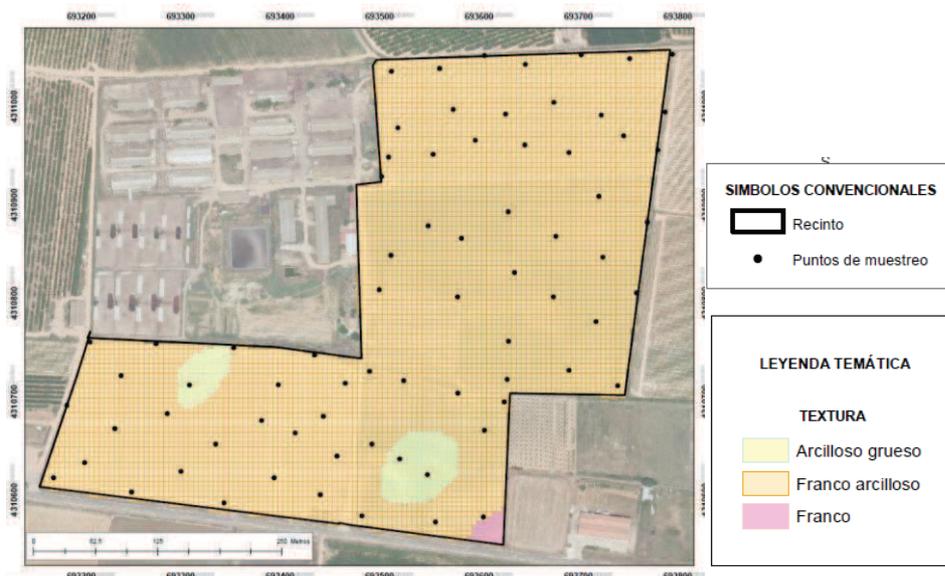


Figura 46: Mapa nº 6 Clases texturales (ISSS).

4.3. INTERPRETACIÓN AGRÍCOLA DE LOS RESULTADOS

Con el parámetro pH se obtuvo el *mapa nº 1 del Anexo*, en el que observa que la superficie estudiada tiene unos valores de pH entre 7.4 y 8.3 que equivalen a medianamente básico y básico. En la tabla 5 está el valor óptimo de pH en función del cultivo, siendo esos cultivos los herbáceos de regadío más abundante en la comarca a la que pertenece la zona del estudio. Sería aconsejable si se van a implantar esos cultivos que se haga algún tratamiento para bajar el valor de pH.

Tabla 5: Intervalos de pH deseables para distintos cultivos

Cultivo	intervalo pH
Tomate	5,4 - 6,6
Maíz	5,5 - 7,5
Pimiento	5,4 - 6,7

Fuente: Sánchez M. (1998).

En el *mapa nº 2 del Anexo* se muestra la variación espacial de la conductividad eléctrica en $\mu\text{S}/\text{cm}$. Se observa que el valor oscila entre 224 y 330 $\mu\text{S}/\text{cm}$ siendo, según la bibliografía consultada, un suelo no salino.

Tabla 6: Valoración del suelo en función de la conductividad eléctrica.

VALORACIÓN DEL SUELO SEGÚN SU CONDUCTIVIDAD	RANGOS DE CONDUCTIVIDAD
No salino	Valor < 2.000
Ligeramente salino	2.000 <= Valor <4.000
Salino	Valor >= 4.000

Fuente: Valoraciones en análisis de suelos del Laboratorio de Análisis Agrícola de INEA. <http://www.inea.org/>

Los mapas de las características edafológicas del suelo muestran la variación espacial de cada variable (Mapas 3, 4 y 5 del anexo). Por el contrario, el mapa de clase textural *mapa nº 8 del anexo*, permite delimitar áreas dentro de las cuales ocurre una determinada combinación de las



diferentes características del suelo gracias a esa variabilidad espacial. Se han obtenido 3 clases texturales diferentes, siendo 16.1 hectáreas suelo franco arcilloso, 0.65 hectáreas de suelo arcilloso grueso y 892 m² de suelo franco.

La información aportada por los mapas de propiedades individuales del suelo y el mapa de clases texturales es complementaria y puede ser combinada por medio de programas de manejo de sistemas de información geográfica, para permitirle al usuario mayor flexibilidad de consulta. Además este trabajo puede ser ampliado incluyendo otros parámetros del suelo y realizándose cada cierto tiempo, para así obtener una serie de mapas detallados de todas las propiedades del suelo a lo largo de los años y tomar decisiones correctas en el uso de insumos agrícolas en cada zona de la parcela; llevando a cabo la filosofía de la agricultura de precisión.

5. CONCLUSIONES

Los resultados se han obtenido a partir 74 muestras de suelo georreferenciadas dispersas por la superficie estudiada. Para el estudio se ha utilizado el método geoestadístico de *Kriging Ordinario* y se han utilizado los programas de *Statgraphics*, *VESPER* y *ArcGIS*.

Se han estudiado los parámetros de estructura del suelo obteniendo los mapas correspondientes a la distribución espacial de la arena, limo y arcilla. A partir de esos mapas se han identificado tres tipos diferentes de textura del suelo utilizando la clasificación del ISSS. Las clases texturales corresponden a franco, franco arcilloso y arcilloso grueso y se ha delimitado la extensión de cada una de ellas.

Se ha estudiado la distribución del pH por la superficie estudiada, obteniendo que en general la finca posee un valor de pH alto. Se ha obtenido un mapa en el que se observa la distribución espacial de este parámetro.

El parámetro de conductividad eléctrica es el que ha tenido una distribución de los datos no normal, teniendo que ser transformados para poder obtener unos mapas fiables del *kriging ordinario*. En general la parcela no tiene el suelo salino, aunque si se aprecia en el mapa correspondiente que el valor de CE no es igual por toda la superficie.

El SIG y los mapas de distribución espacial del contenido de los tipos de textura, como el de las clase texturales, pH y conductividad eléctrica constituyen una fuente de información que podrá, junto con otros parámetros del suelo, ser actualizada periódicamente, y posibilitará el diagnóstico de todas las variables que estén relacionadas con la producción agrícola, mejorando el manejo en las labores y maximizando el rendimiento de los insumos agrícolas al aplicarse la cantidad justa en el lugar adecuado. Esta herramienta que puede ser utilizado ahora y en el futuro junto con los instrumentos adecuados para realizar una agricultura de precisión rentable y útil para el agricultor.



6. BIBLIOGRAFÍA

- Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino. “Guía práctica de la fertilización racional de los cultivos en España”, año 2009.
- *Porta J. 2003, Edafología para la agricultura y el medio ambiente. Mundi-prensa, 929 páginas.*
- *MULLA, D. J. (1997). Geostatistics, remote sensing and precision farming, In: Precision Agriculture: spatial and temporal variability of environmental quality, Wiley Chichester (Ciba foundation Symposium 210) p100-115.*
- *HENRÍQUEZ, C. (2013). Interpolación de variables de fertilidad de suelo mediante el análisis kriging y su validación. Resultados parciales del proyecto VI-733-A7-609 de la Universidad de Costa Rica. Proyecto cofinanciado por el Instituto de Fomento cooperativo (INFOCOOP).*
- *IBARRA, D. (2009). Clasificación espacial de la textura de los suelos agrícolas de Zapopan Jalisco.*
- *BOGDAN ROȘCA (2013). Soil survey and mapping using qgis in the specific methodological context of romania.*
- *DOERGE, T. (1999) Soil Electrical Conductivity Mapping, Crop Insights, Vol. 9 No. 19.*
- *LOGEMIN S.A., Mapeo de Conductividad Eléctrica del Suelo*
- *Agricultura Andina / Volumen 12 Enero - Junio 2007. Caracterización de los suelos con fines agroforestales en la finca U.LA., unidad experimental caparo, 41-53.*
- *García F.- Universidad de Vigo. FUNDAMENTOS DE GEOESTADÍSTICA.*
- *CABALLERO W. (2011). Kriging universal para datos funcionales.*
- *T. HENGL (2007). A Practical Guide to Geostatistical Mapping of Environmental Variables.*
- *SOSA PAZ, C.J. (2002). Método geoestadístico de Krige: una aplicación a la distribución pluvial en el estado de Tabasco.*
- *ARNÓ J. (2008). Tesis: Una investigación sobre la variabilidad intraparcelsaria en viña y el uso de sensores láser en viticultura de precisión. 262 páginas.*
- *PINTOS S. (2012) Predicción geoestadística: Kriging Simple, Ordinario y con Tendencia.*
- *Doerge, T. (1999) Soil Electrical Conductivity Mapping.*
- *Sanchez M. (1998). Guía de Interpretación análisis de suelos y anexo.*
- Wikipedia.



7. ANEXO

En este apartado se encuentran los mapas obtenidos en este trabajo, resultados del Kriging Ordinario.

- MAPA Nº 1: Distribución espacial del pH.
- MAPA Nº 2: Distribución espacial de la conductividad eléctrica.
- MAPA Nº 3: Distribución espacial de arena.
- MAPA Nº 4: Distribución espacial de limo.
- MAPA Nº 5: Distribución espacial de arcilla.
- MAPA Nº 6: Clase textural.

693200 693300 693400 693500 693600 693700 693800



SIMBOLOS CONVENCIONALES

- Puntos de muestreo
- ▭ Recinto

LEYENDA TEMÁTICA

pH

- De 7,4 a 7,5
- De 7,51 a 7,8
- De 7,71 a 7,8
- De 7,81 a 7,9
- de 7,91 a 8
- de 8 a 8,3

ESTUDIOS DE LA VIABILIDAD ESPACIAL DE LAS CARACTERÍSTICAS EDAFOLÓGICAS EN UNA REGIÓN HORTÍCOLA

Título: Distribución espacial del pH	Mapa: 1
---	------------

Escala: 1:3.000	Fecha: Julio 2014
--------------------	----------------------



Universidad de Valladolid

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍAS AGRARIAS

Titulación:
MÁSTER EN TECNOLOGÍAS AVANZADAS PARA EL DESARROLLO AGROFORESTAL

Curso:
2013-2014

Alumno:
ANA ISABEL JIMÉNEZ GIL

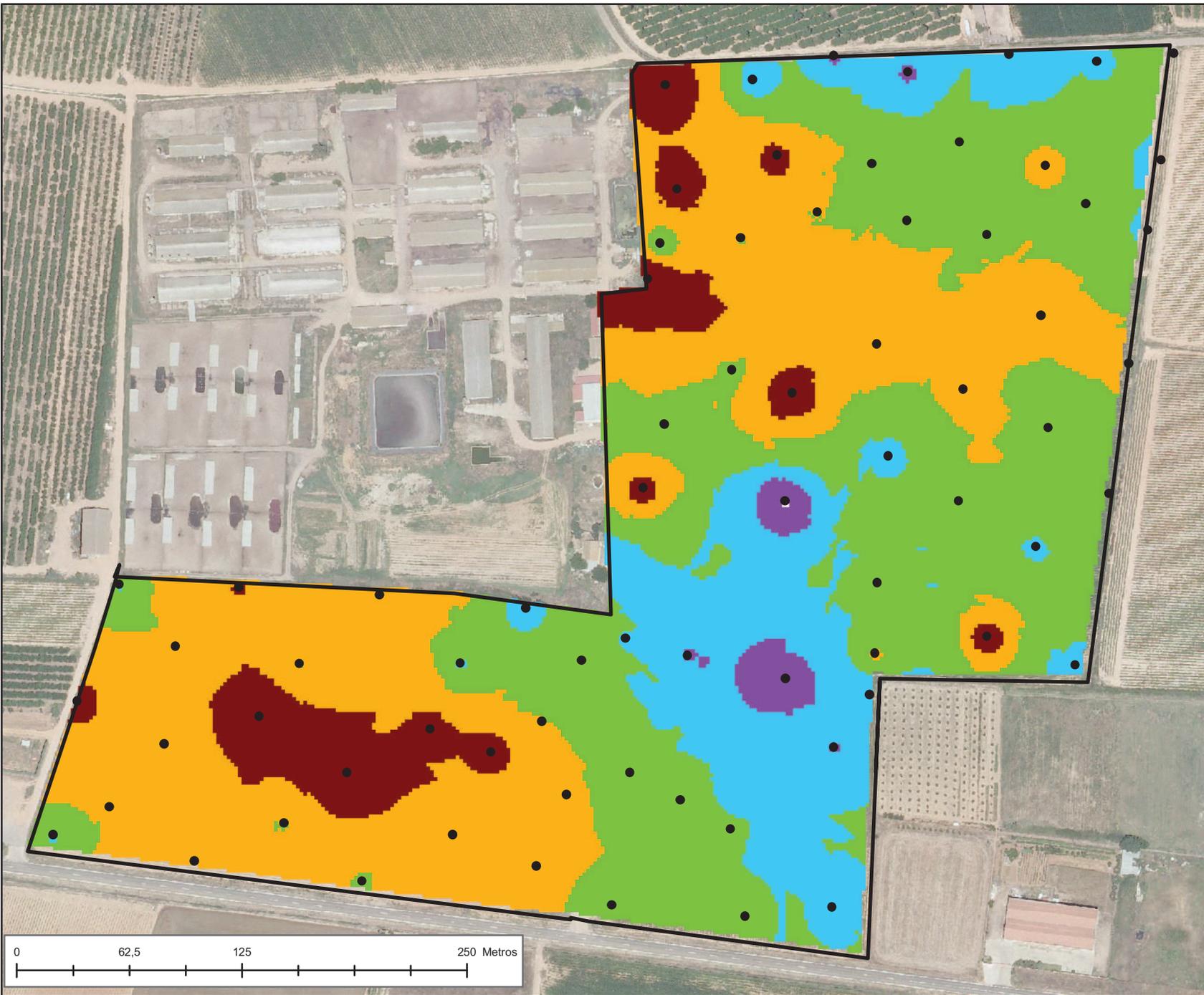
Firma:

4311000 4310900 4310800 4310700 4310600

4311000 4310900 4310800 4310700 4310600



693200 693300 693400 693500 693600 693700 693800



693200.000000

693300.000000

693400.000000

693500.000000

693600.000000

693700.000000

693800.000000



SIMBOLOS CONVENCIONALES

- Puntos de muestreo
- Recinto

LEYENDA TEMÁTICA

CE

- Entre 224 y 230 $\mu\text{S}/\text{cm}$
- Entre 231 y 240 $\mu\text{S}/\text{cm}$
- Entre 241 y 250 $\mu\text{S}/\text{cm}$
- Entre 251 y 260 $\mu\text{S}/\text{cm}$
- Entre 261 y 270 $\mu\text{S}/\text{cm}$
- Entre 271 y 280 $\mu\text{S}/\text{cm}$
- Entre 281 y 300 $\mu\text{S}/\text{cm}$
- Entre 301 y 330 $\mu\text{S}/\text{cm}$

ESTUDIOS DE LA VIABILIDAD ESPACIAL DE LAS CARACTERÍSTICAS EDAFOLÓGICAS EN UNA REGIÓN HORTÍCOLA

Título: Distribución espacial de la conductividad eléctrica (CE)

Mapa: 2

Escala: 1:3.000

Fecha: Julio 2014



Universidad de Valladolid

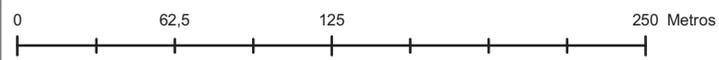
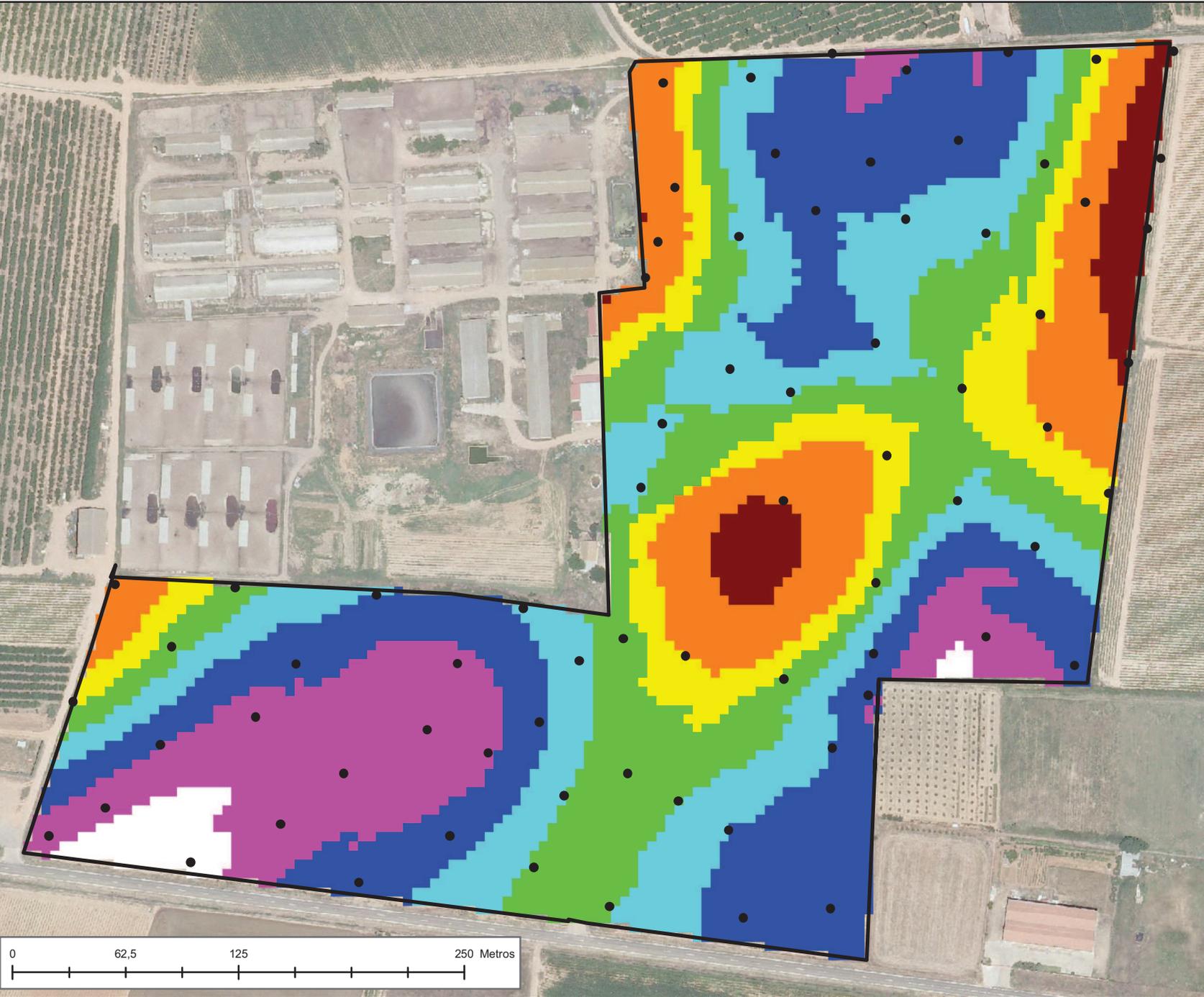
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍAS AGRARIAS

Titulación: MÁSTER EN TECNOLOGÍAS AVANZADAS PARA EL DESARROLLO AGROFORESTAL

Curso: 2013-2014

Alumno: ANA ISABEL JIMÉNEZ GIL

Firma:



693200.000000

693300.000000

693400.000000

693500.000000

693600.000000

693700.000000

693800.000000

4311000.000000

4310900.000000

4310800.000000

4310700.000000

4310600.000000

693200.000000 693300.000000 693400.000000 693500.000000 693600.000000 693700.000000 693800.000000



SÍMBOLOS CONVENCIONALES

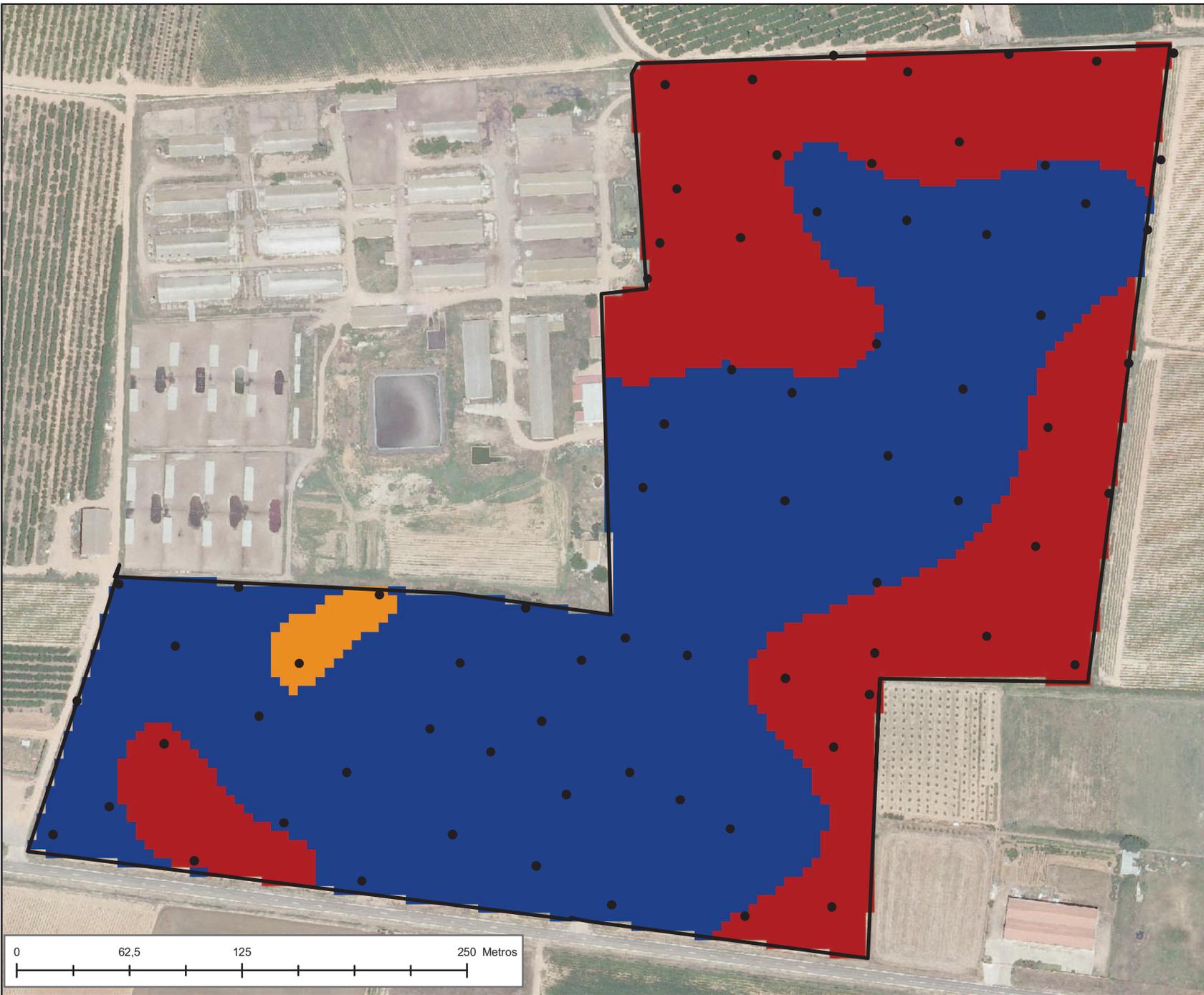
- Puntos de muestreo
- Recinto

LEYENDA TEMÁTICA

- Del 10% al 15%
- Del 15% al 20%
- Del 20% al 25%
- Del 25% al 30%
- Del 30% al 35%
- Del 35% al 40%
- Del 40% al 45%
- Del 45% al 50%

4311000.000000
4310900.000000
4310800.000000
4310700.000000
4310600.000000

4311000.000000
4310900.000000
4310800.000000
4310700.000000
4310600.000000



693200.000000 693300.000000 693400.000000 693500.000000 693600.000000 693700.000000 693800.000000

ESTUDIOS DE LA VIABILIDAD ESPACIAL DE LAS CARACTERÍSTICAS EDAFOLÓGICAS EN UNA REGIÓN HORTÍCOLA

<i>Título:</i> Distribución espacial del contenido de arena	<i>Mapa:</i> 3
<i>Escala:</i> 1:3.000	<i>Fecha:</i> Julio 2014

 Universidad de Valladolid ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍAS AGRARIAS	Titulación: MÁSTER EN TECNOLOGÍAS AVANZADAS PARA EL DESARROLLO AGROFORESTAL
	Curso: 2013-2014
	Alumno: ANA ISABEL JIMÉNEZ GIL

Firma:

693200.000000 693300.000000 693400.000000 693500.000000 693600.000000 693700.000000 693800.000000



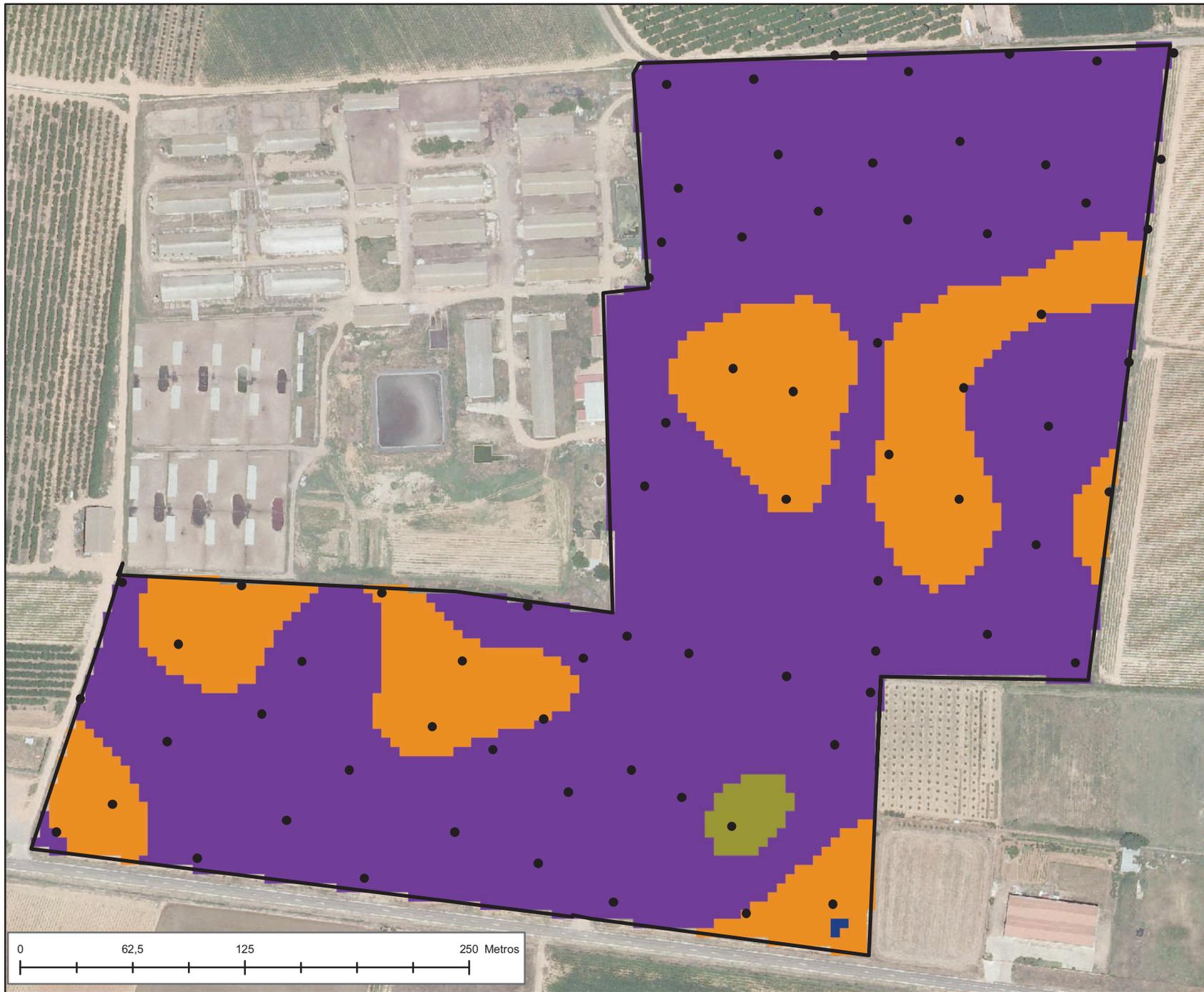
SÍMBOLOS CONVENCIONALES

- Puntos de muestreo
- Recinto

LEYENDA TEMÁTICA

- Del 10% al 15%
- Del 15% al 20%
- Del 20% al 25%
- Del 25% al 30%
- Del 30% al 35%
- Del 35% al 40%
- Del 40% al 45%
- Del 45% al 50%

4311000.000000
4310900.000000
4310800.000000
4310700.000000
4310600.000000



4311000.000000
4310900.000000
4310800.000000
4310700.000000
4310600.000000



693200.000000 693300.000000 693400.000000 693500.000000 693600.000000 693700.000000 693800.000000

ESTUDIOS DE LA VIABILIDAD ESPACIAL DE LAS CARACTERÍSTICAS EDAFOLÓGICAS EN UNA REGIÓN HORTÍCOLA

Título: Distribución espacial del contenido de limo	Mapa: 4
Escala: 1:3.000	Fecha: Julio 2014


Universidad de Valladolid
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍAS AGRARIAS

Titulación:
 MÁSTER EN TECNOLOGÍAS AVANZADAS PARA EL DESARROLLO AGROFORESTAL
 Curso:
 2013-2014
 Alumno:
 ANA ISABEL JIMÉNEZ GIL
 Firma:

693200.000000 693300.000000 693400.000000 693500.000000 693600.000000 693700.000000 693800.000000



SIMBOLOS CONVENCIONALES

- Puntos de muestreo
- Recinto

LEYENDA TEMÁTICA

- Del 10% al 15%
- Del 15% al 20%
- Del 20% al 25%
- Del 25% al 30%
- Del 30% al 35%
- Del 35% al 40%
- Del 40% al 45%
- Del 45% al 50%

ESTUDIOS DE LA VIABILIDAD ESPACIAL DE LAS CARACTERÍSTICAS EDAFOLÓGICAS EN UNA REGIÓN HORTÍCOLA

<i>Título:</i> Distribución espacial del contenido de arcilla	<i>Mapa:</i> 5
<i>Escala:</i> 1:3.000	<i>Fecha:</i> Julio 2014



Universidad de Valladolid

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍAS AGRARIAS

Titulación:
MÁSTER EN TECNOLOGÍAS AVANZADAS PARA EL DESARROLLO AGROFORESTAL

Curso:
2013-2014

Alumno:
ANA ISABEL JIMÉNEZ GIL

Firma:

4311000.000000
4310900.000000
4310800.000000
4310700.000000
4310600.000000

4311000.000000
4310900.000000
4310800.000000
4310700.000000
4310600.000000



693200.000000 693300.000000 693400.000000 693500.000000 693600.000000 693700.000000 693800.000000

693200 000000 693300 000000 693400 000000 693500 000000 693600 000000 693700 000000 693800 000000



SIMBOLOS CONVENCIONALES

-  Recinto
-  Puntos de muestreo

LEYENDA TEMÁTICA

TEXTURA

-  Arcilloso grueso
-  Franco arcilloso
-  Franco

ESTUDIOS DE LA VIABILIDAD ESPACIAL DE LAS CARACTERÍSTICAS EDAFOLÓGICAS EN UNA REGIÓN HORTÍCOLA

<i>Título:</i> Clase textural (ISS)	<i>Mapa:</i> 6
<i>Escala:</i> 1:3.000	<i>Fecha:</i> Julio 2014



Universidad de Valladolid

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍAS AGRARIAS

Titulación:
MÁSTER EN TECNOLOGÍAS AVANZADAS PARA EL DESARROLLO AGROFORESTAL

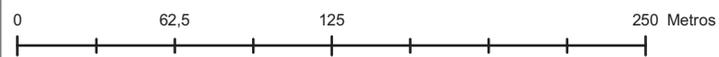
Curso:
2013-2014

Alumno:
ANA ISABEL JIMÉNEZ GIL

Firma:

4311000 000000
4310900 000000
4310800 000000
4310700 000000
4310600 000000

4311000 000000
4310900 000000
4310800 000000
4310700 000000
4310600 000000



693200 000000 693300 000000 693400 000000 693500 000000 693600 000000 693700 000000 693800 000000

