

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA
FACULTAD DE RECURSOS NATURALES RENOVABLES
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA EN CONSERVACIÓN DE
SUELOS Y AGUA



DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LAS PROPIEDADES DEL SUELO EN
UN ÁREA DE PRODUCCIÓN DE PALMA ACEITERA (*Elaeis guineensis*
Jacq) DE NUEVA LIBERTAD, PROVINCIA DE TOCACHE,
DEPARTAMENTO DE SAN MARTIN

Tesis

para optar el título de

INGENIERO EN CONSERVACIÓN DE SUELOS Y
AGUA

PRESENTADO POR

AMOS ARÓSTEGUI ENCARNACIÓN

Tingo María - Perú

2022



ACTA DE SUSTENTACION DE TESIS N°026-2023-FRNR-UNAS

Los que suscriben, Miembros del Jurado de Tesis, reunidos con fecha 29 de septiembre de 2022, a horas 14:00 p.m. de la Escuela Profesional de Ingeniería en Conservación de Suelos y Agua de la Facultad de Recursos Naturales Renovables para calificar la tesis titulada:

**“DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LAS PROPIEDADES DEL SUELO EN UN
ÁREA DE PRODUCCIÓN DE PALMA ACEITERA (*Elaeis guineensis* Jacq) de
NUEVA LIBERTAD, PROVINCIA DE TOCACHE, DEPARTAMENTO DE
SAN MARTIN”**

Presentado por el Bachiller: **AMOS AROSTEGUI ENCARNACION**, después de haber escuchado la sustentación y las respuestas a las interrogantes formuladas por el Jurado, se declara **APROBADO** con el calificativo de **“MUY BUENO”**.

En consecuencia, el sustentante queda apto para optar el Título Profesional de **INGENIERO EN CONSERVACION DE SUELOS Y AGUA** que será aprobado por el Consejo de Facultad, Tramitándolo al Consejo Universitario para el otorgamiento del Título Correspondiente.

Tingo María, 13 de abril de 2023


Ing. M.Sc. JOSE D. LEVANO CRISOSTOMO
PRESIDENTE




Ing. M.Sc. JUAN PABLO RENGIFO TRIGOZO
MIEMBRO


Ing.M.Sc. ERLE OTTO J. BUSTAMANTE SCAGLIONI
MIEMBRO


Dr. LUCIO MANRIQUE DE LARA SUAREZ
ASESOR



UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA
REPOSITORIO INSTITUCIONAL DIGITAL
(RIDUNAS)

Correo: repositorio@unas.edu.pe



“Año de la unidad, la paz y el desarrollo”

CERTIFICADO DE SIMILITUD T.I. N° 166 - 2023 - CS-RIDUNAS

El Coordinador de la Oficina de Repositorio Institucional Digital de la Universidad Nacional Agraria de la Selva, quien suscribe,

CERTIFICA QUE:

El trabajo de investigación; aprobó el proceso de revisión a través del software TURNITIN, evidenciándose en el informe de originalidad un índice de similitud no mayor del 25% (Art. 3° - Resolución N° 466-2019-CU-R-UNAS).

Facultad:

Facultad de Recursos Naturales Renovables

Tipo de documento:

Tesis	X	Trabajo de investigación	
-------	---	--------------------------	--

TÍTULO	AUTOR	PORCENTAJE DE SIMILITUD
DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LAS PROPIEDADES DEL SUELO EN UN ÁREA DE PRODUCCIÓN DE PALMA ACEITERA (<i>Elaeis guineensis</i> Jacq) DE NUEVA LIBERTAD, PROVINCIA DE TOCACHE, DEPARTAMENTO DE SAN MARTIN	AMOS ARÓSTEGUI ENCARNACIÓN	14% Catorce

Tingo María, 26 de junio de 2023


Mg. Ing. García Villegas, Christian
Coordinador del Repositorio Institucional Digital (RIDUNAS)

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA
FACULTAD DE RECURSOS NATURALES RENOVABLES
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA EN CONSERVACIÓN DE
SUELOS Y AGUA



DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LAS PROPIEDADES DEL SUELO EN
UN ÁREA DE PRODUCCIÓN DE PALMA ACEITERA (*Elaeis guineensis*
Jacq) DE NUEVA LIBERTAD, PROVINCIA DE TOCACHE,
DEPARTAMENTO DE SAN MARTIN

Autor	: ARÓSTEGUI ENCARNACIÓN, Amos
Asesor	: Dr. MANRIQUE DE LARA SUÁREZ, Lucio
Programa de investigación	: Manejo y conservación de suelo
Línea de investigación	: Zonificación Ecológica y Económica
Eje temático	: Calidad de Suelo en Cultivo de Palma Aceitera
Lugar de ejecución	: Nueva Libertad, Tocache
Duración	: 06 meses
Financiamiento	: Propio

Tingo María - Perú, 2021

DEDICATORIA

A mi padre PABLO AROSTEGUI MALPARTIDA y a mi madre WILMAR ENCARNACIÓN LINO, por ser motivo e inspiración para superarme como profesional en la vida.

A mis hermanos GENY DALMER SANDOVAL ENCARNACIÓN y RONAL AROSTEGUI MALPARTIDA por ser compañeros verdaderos durante este viaje de muchas adversidades que se tiene en la de vida y la superación personal como profesional.

A mis familiares, tíos, primos y abuelos y amigos gracias por sus alientos y sabios consejos para seguir adelante y por formar parte de mi vida y de mis sueños.

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Nacional Agraria de la Selva, por ser mi alma mater, por permitirme compartir en sus aulas, la satisfacción del aprender.

A los docentes de la Facultad de Recursos Naturales Renovables en especial a los docentes de la especialidad de Ingeniería en Conservación de Suelos y Agua que quienes entregaron todos sus conocimientos y experiencias donde se mostraron alegres y con gran predisposición para entregarme sus conocimientos y experiencias que vinieron ejerciendo en el ámbito de educación y proyectos de inversión públicas y privadas.

Al Dr. Lucio Manrique de Lara Suarez y el Ingeniero Erle Otto Javier Bustamante Scaglioni por su insuperable aporte a la presente investigación. Gracias por su enorme paciencia, empeño y gran calidad profesional

A todos mis compañeros, personas incomparables que me acompañaron durante este camino maravilloso.

El autor

ÍNDICE

Contenido	Página
I. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Hipótesis.....	2
1.2. Objetivo general.....	2
1.3. Objetivos específicos.....	2
II. REVISIÓN DE LITERATURA	3
2.1. Geoestadística.....	3
2.1.1. Series temporales estacionarias.....	3
2.1.2. Series temporales no estacionarias.....	3
2.1.3. Tendencia.....	3
2.1.4. Regresión lineal.....	4
2.1.5. Modelo de regresión lineal múltiple.....	5
2.1.6. Prueba de normalidad.....	5
2.2. Variabilidad espacial de suelos.....	7
2.3. Análisis y representación de la distribución espacial (Yost, Uehara, & Fox, 1982).....	8
2.3.1. Semivarianza.....	8
2.3.2. Semivariograma.....	8
2.3.3. Modelos de semivariograma.....	10
2.3.4. Interpolación.....	10
2.3.5. Método Kriging.....	11
2.3.6. Método Distancia Inversa Ponderada (IDW).....	12
2.4. Validación cruzada.....	13
2.5. Propiedades físicas del suelo.....	13
2.5.1. Textura del suelo.....	13
2.5.2. Densidad aparente.....	14
2.5.3. Porosidad.....	14
2.5.4. Resistencia a la penetración.....	15
2.6. Propiedades químicas del suelo.....	15
2.6.1. El pH.....	15
2.6.2. Materia orgánica.....	16
2.6.3. Nutrientes.....	17
2.7. Antecedentes de estudio.....	18
III. MATERIALES Y MÉTODOS	21
3.1. Lugar de ejecución.....	21

	2
3.1.1. Ubicación.....	21
3.1.2. Acceso	21
3.1.3. Características generales del área en investigación	21
3.2. Materiales y métodos.....	22
3.2.1. Materiales y equipos.....	22
3.2.2. Metodología.....	23
IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	29
4.1. Analizar los datos espaciales de las propiedades químicas del suelo.	29
4.1.1. Estadística descriptiva	29
4.1.2. Prueba de Kolmogorov-Smirnov	32
4.1.3. Mapa de Voronoi.....	32
4.1.4. Tendencia	33
4.1.5. Semivarianza.....	34
4.2. Estimar los modelos de las propiedades químicas mediante la interpolación KO y IDW.....	36
4.2.1. Parámetros del modelo de KO	36
4.2.2. Distribución espacial de las propiedades químicas	37
4.3. Validar los modelos de distribución espacial de las propiedades químicas	45
V. CONCLUSIONES.....	48
VI. RECOMENDACIONES.....	49
VII. REFERENCIAS	50
ANEXOS	57

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla	Página
1. Clasificación textural de suelos	14
2. Clasificación de los niveles de pH en los suelos.	16
3. Clasificación de suelos según el nivel de materia orgánica	16
4. Clasificación de suelos de acuerdo al nivel de fósforo.....	18
5. Clasificación de suelos de acuerdo al nivel de potasio.....	18
6. Métodos empleados para analizar los parámetros físico y químico del suelo.....	25
7. Parámetros del variograma	26
8. Medidas de evaluación del modelo.	27
9. Elección del modelo.	27
10. Validación de la interpolación.....	28
11. Estadísticos descriptivos de las propiedades fisicoquímicas.....	29
12. Prueba de normalidad de los parámetros físico y químico de los suelos en estudio de acuerdo al tipo de muestra.....	32
13. Tendencia espacial de los datos.....	34
14. Parámetros del semivariograma de Kriging Ordinario.....	36
15. Correlación de Pearson entre los parámetros físicos y químicos.	45
16. Valores de validación para el KO e IDW.....	46
17. Valores de eficiencia de predicción (E) y del coeficiente de correlación (r).	47

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura	Página
1. Estructura del semivariograma.....	10
2. Ubicación del área de experimento	21
3. Unidades de muestreo del suelo en la parcela con producción de palma aceitera	25
4. Valores de los parámetros: pH, materia orgánica (M.O.), nitrógeno (N), fósforo (P) y potasio (K) de los suelos en estudio	31
5. Mapa de Voronoi para las propiedades químicas del suelo	33
6. Semivarianza de las propiedades químicas.	35
7. Mapa de pH del suelo por la interpolación KO e IDW.	39
8. Mapa de materia organica (MO) del suelo por la interpolación KO e IDW	40
9. Mapa de nitrogeno (N) del suelo por la interpolación KO e IDW.	42
10. Mapa de fosforo (P) del suelo por la interpolación KO e IDW.....	43
11. Mapa de potasio (K) del suelo por la interpolación KO e IDW.....	44

RESUMEN

El presente estudio tuvo como objetivo analizar la distribución espacial de las propiedades fisicoquímicas del suelo en un área de producción de *Elaeis guineensis* Jacq (palma aceitera) en el centro poblado de Nueva Libertad, ubicado en el distrito y provincia de Tocache – San; para esto se utilizaron diversas teorías geoestadísticas. Basado en 30 muestras distribuidas a través de un muestreo sistemático en el área experimental se estimó la distribución espacial de del pH, materia orgánica, nitrógeno, fósforo y potasio en el suelo con la técnica de interpolación; se utilizó el método Kriging Ordinario (KO) e IDW, teniéndose que, el modelo de distribución espacial que se ajustó de mejor manera fue el modelo KO para el pH circular, M.O gaussiano, N circular, P gaussiano y K exponencial, mediante contrastaciones de los modelos del semivariograma circular, esférico, gaussiano y exponencial. El análisis de los métodos de acuerdo al rango de valores del semivariograma en los parámetros detalla para el pH circular (541,4 m), M.O. gaussiano (247,2 m), N circular (309,9 m), P gaussiano (557,2 m) y de K exponencial (552.05 m), los cuales garantizan la interpolación elaborada. Finalmente, la validación se realizó analizando el error cuadrático medio (EM) teniéndose que los mejores valores se registraron en el método KO para pH circular (0,0053), M.O. gaussiano (0.0089), N circular (0.00001), P gaussiano (0.0151) y K exponencial (-0.422). Estos valores indican que el modelo de KO es el mejor modelo de ajuste en relación a la interpolación de los elementos.

Palabras clave: Kriging ordinario, IDW, interpolación espacial, palma aceitera

ABSTRACT

Currently, the application of geographic information systems in agriculture is of great importance to understand soil variability; thus, the objective of this study was to analyze the spatial distribution of soil physicochemical properties in a production area of *Elaeis guineensis* Jacq (oil palm) in the town of Nueva Libertad, district of Tocache, province of Tocache - San Martin; for this purpose, several geostatistical theories were used. On the basis of 30 samples distributed by systematic sampling in the experimental area, the spatial distribution of pH, organic matter, nitrogen, phosphorus and potassium in the soils was estimated by spatial interpolation; the ordinary kriging (KO) and IDW methods were used, and the spatial distribution model that fitted best was the KO model for circular pH, M. O Gaussian, N circular, P Gaussian and K exponential, among the comparisons of the semivariograms (circular, spherical, Gaussian and exponential). The analysis of the methods according to the range of values of the semivariogram in the parameters detailed for the circular pH (541.4 m), Gaussian M.O. (247.2 m), circular N (309.9 m), Gaussian P (557.2 m) and exponential K (552.05 m), which guarantee the elaborated interpolation. Finally, the validation was performed by analyzing the root mean square error (RMSE) and the best values were recorded in the KO method for circular pH (0.038), Gaussian M.O. (0.028), circular N (0.00009), Gaussian P (1.35) and exponential K (324.52). These values indicate that the KO model is the best fitting model in relation to the interpolation of the elements.

Key words: Ordinary Kriging, IDW, spatial interpolation, oil palm.

I. INTRODUCCIÓN

Durante la gestión del territorio, se han utilizado tradicionalmente las descripciones de campo, los análisis de laboratorio, la clasificación y cartografía, las interpretaciones de las unidades o series de suelos. Los altos costos económicos y el tiempo que implica estos métodos para generar información del territorio, así como su posterior análisis e interpretación, generan una carencia generalizada de datos idóneos que reflejen patrones espaciales de las propiedades del suelo que determinen su comportamiento.

Así, en la actualidad, la aplicación de sistemas de información geográfica en la actividad agrícola tiene gran importancia para entender la variabilidad del suelo, asociaciones vegetales, rendimiento por cultivo, planificación de obras de infraestructura al interior de unidades productivas, para la proyección adecuada de la fertilización, entre otros. Particularmente, la variación o distribución espacial de las características físicas y químicas del suelo está referida a predicciones basadas en las interpolaciones de puntos no muestreados; en la agricultura, puede estar inducida por las diversas prácticas de labranza del cultivo. Sabiendo que la variabilidad puede ser alta en superficies relativamente reducidas; durante los últimos años se ha investigado profundamente en la aplicación de metodologías para comprender la variación o variabilidad de las características de los suelos, de modo que se pueda mejorar el manejo y tener así, una mejor eficiencia y rentabilidad en la producción. Los métodos están basados en modelos estadísticos desarrollados a partir de atributos del suelo, medidos en campo, en puntos donde es posible determinar otras variables como la topografía, clima, tipo de vegetación, material original y uso actual del suelo, esto permite minimizar el número de muestras necesarias para generar predicciones espaciales. En la agricultura de precisión (AP) conocer la distribución espacial de las propiedades del suelo es útil para identificar prácticas efectivas de manejo, basadas en la variabilidad observada se implementan prácticas que consideren la diversidad de procesos físicos, químicos y biológicos que dependen de sus atributos.

Por otro lado, en la actualidad la mayoría de palmicultores de la zona de Nueva Libertad de la Provincia de Tocache – San Martín, realizan la agricultura acorde a su conocimiento empírico, con técnicas de sus ancestros sin considerar la calidad del sitio, ni paquetes tecnológicos sostenidos, haciendo un mal manejo del suelo, lo que resulta en cultivos susceptibles a plagas y enfermedades, con bajos rendimientos y con pérdidas económicas. En ese sentido, evidenciándose un mal manejo de los suelos en el sector de Nueva Libertad, con ello, la baja producción de palma influenciada en los pobladores con sus calidades de vida. Asimismo, las técnicas de interpolación espacial representan la distribución de las propiedades

químicas del suelo en un área de producción de palma aceitera, por ello se formula la siguiente pregunta de investigación: ¿Cómo es la distribución espacial de las propiedades físicas y químicas del suelo en el sector de Nueva Libertad, y la representación mayor probable de las propiedades fisicoquímicas en el espacio que ocupa el área de producción de palma aceitera?

1.1. Hipótesis

El modelo Kriging Ordinario (KO) representa una mejor distribución espacial de las propiedades químicas del área de producción de *Elaeis guineensis* Jacq (palma aceitera).

1.2. Objetivo general

- Estimar la distribución espacial del pH, M.O., N, P y K en el área de producción de *Elaeis guineensis* Jacq (palma aceitera) del centro poblado de Nueva Libertad, distrito de Tocache, provincia de Tocache - San Martín.

1.3. Objetivos específicos

- Analizar los datos espaciales de las propiedades químicas (pH, M.O., N, P y K) del suelo.
- Estimar los modelos de las propiedades químicas mediante la interpolación KO y IDW.
- Validar los modelos de distribución espacial de las propiedades químicas de KO y IDW.

II. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. Geoestadística

La estadística tiene una rama que se denomina Geoestadística, la cual se centra en explorar y mapear patrones espaciales de variables localizadas, focalizado en modelar e interpretar los variogramas. Siendo un instrumento que permita analizar la variabilidad en tamaños distante por intervalos que serán analizados (Goovaerts, 1997). Según Emery (2013) (Universidad Carlos III de Madrid, s.f.) especifica el estudio de fenómenos regionalizados o localizados, como se esparcen en el espacio y muestran cierto grado de continuidad. La palabra “espacio”, hace alusión al espacio geográfico, sin embargo, también puede relacionarse con el eje temporal o de espacios indeterminados. El asunto analizado tendrá una presentación numérica del fenómeno regionalizado, es decir, más de una función matemática que calculen una propiedad u atributo específico asociado al fenómeno, denominado variable regionalizado. Conceptualmente, la variable regionaliza se denomina una función determinista. Generalmente tiene dos características que se complementan: por un lado, representa un grado “continuidad” espacial (región de valores altos/ región de valores bajos), pero, con respecto al segundo, varía de manera desigual y se deshace de cualquier representación simple.

2.1.1. Series temporales estacionarias

Se trata de una serie básicamente estable en el tiempo, sin aumento ni disminución de su valor. Para este tipo de series, los conceptos como media y la varianza tienen gran importancia. Sin embargo, los mismos métodos también se pueden aplicar a series no estacionarias si primero se convierte en series estacionarias (UC3M, s.f.).

2.1.2. Series temporales no estacionarias

La media y/o variabilidad son series que cambian en el tiempo. Las variaciones en la media determinan una tendencia de aumento o disminución a largo plazo, por lo que la serie no fluctúa cerca de un valor fijo (UC3M, s.f.).

2.1.3. Tendencia

De acuerdo a la UNAL (s.f.), es un cambio pausado y de largo plazo de la secuencia Y_t , se supone que está determinada por una función T_t de t , que es el modelo a evaluar. Otra definición de tendencia es “la evolución a largo plazo de la secuencia promedio”. Los modelos de tendencias son: Lineal, cuadrático, cúbico, exponencial y logarítmica.

- **Lineal:** Crea una línea de tendencia según una función lineal minimizando la suma de los cuadrados de las desviaciones o residuos. La línea de tendencia emplea la ecuación $f(x)=a*x+b$, esto es, una línea recta, donde a y b son constantes.
- **Cuadrática:** Crea una línea e tendencia según una función cuadrática minimizando la suma de los cuadrados de las desviaciones o residuos. La línea de tendencia emplea la ecuación $f(x)=a*x^2+b*x+c$, donde a , b y c son constantes.
- **Logarítmica:** Crea una línea de tendencia según una función logarítmica minimizando la suma de los cuadrados de las desviaciones o residuos. La línea de tendencia emplea la ecuación $f(x) = a*\ln(x)+b$, donde a y b son constantes.
- **Cúbico:** Crea una línea de tendencia según una función polinómica minimizando la suma de los cuadrados de las desviaciones o residuos. La línea de tendencia emplea la ecuación $f(x) = a_n*x^n + \dots + a_3*x^3 + a_2*x^2 + a_1*x + a_0$, donde $a_0 \dots a_n$ son constantes.
- **Exponencial:** Crea una línea de tendencia según una función exponencial minimizando la suma de los cuadrados de las desviaciones o residuos. La línea de tendencia emplea la ecuación $f(x) = a*b^x$, donde a y b son constantes

Dada la serie Y_t , $t = 1, \dots, T$, el modelo adicional supone a Y_t que se divida en tres elementos:

$$Y_t = T_t + S_t + \varepsilon_t$$

Dónde:

T_t = Tendencia

S_t = Elemento estacional

ε_t = Elemento del error

T_t y S_t = Funciones deterministas de t

Su desarrollo suele seguir un patrón muy predecible. El elemento T_t también puede presentarse en pocos acontecimientos un elemento estacional con baja regularidad o a componentes de ciclos estrechamente largos.

2.1.4. Regresión lineal

Según la USC (s.f.) su objetivo es pretender manifestar la relación que tiene dos variables: variable dependiente (respuesta) y un grupo de variables dependientes (explicativas). Este

modelo explica la relación que tiene la variable dependiente con respecto a la variable independiente.

Bondad de ajuste: Es la correlación simple (R) y a su cuadrado. La correlación múltiple es el mismo que el valor absoluto del coeficiente de correlación de Pearson entre aquellas variables:

$$R^2 = 1 - \frac{\text{Suma de cuadrados de los residuos}}{\text{Suma de cuadrado total}}$$

Los residuos se obtienen de las diferencias que presenta aquellos puntos observados y la predicción obtenida con la recta de regresión. Conforme a lo indicado, R^2 manifiesta la relación de la varianza en la variable respuesta expresado por la variable explicativa.

R cuadrado corregido: Es una correlación a la baja de R^2 se fundamenta en los números de casos y de variables independientes.

$$R^2_{CORREGIDO} = R^2 - \left[\frac{p(1 - R^2)}{(n - p - 1)} \right]$$

Donde:

p = número de variables independientes.

n = número de casos.

R^2 = puede ser artificialmente alta.

R^2 corregido = más bajo que el R^2

2.1.5. Modelo de regresión lineal múltiple

De acuerdo a Rojo (2007), un modelo RLM (regresión lineal múltiple) es lo mismo que el modelo RLS (regresión lineal simple), excepto que muestra más de una variable explicativa.

Modelo RLS:

$$y = b_0 + b_1 * x + u$$

Modelo RLM:

$$y = b_0 + b_1 * x_1 + b_2 * x_2 + b_3 * x_3 + \dots + b_n * x_n + u$$

2.1.6. Prueba de normalidad

La prueba de ajuste se emplea a fin de contrastar si los datos de la muestra de la muestra provienen de una cierta distribución o modelo de probabilidad, esto permite a los datos

identificar el tipo de distribución que persiguen y cuáles de las pruebas dos pruebas se pueden realizar en un contraste estadístico. Por lo tanto, para probar la normalidad (es decir, si una muestra se extrae al azar del universo prosiguiendo una función de probabilidad que se ajusta a una distribución gaussiana), se aplicas las siguientes pruebas de bondad de ajuste (Romero, 2016).

2.1.6.1. Prueba de normalidad de Kolmogorov-Smirnov

La prueba de K-S se ocupa de realizar las comparaciones de los datos en las funciones de distribución acumulada empírica (ECDF) con la distribución esperada si los datos fueran normales. En el caso de obtener un contraste enorme, automáticamente la prueba rechaza la hipótesis nula de la distribución normal poblacional. Cuando el valor de “p” está por debajo del nivel de significancia (α) seleccionado, se puede rechazar la hipótesis nula pudiendo llegar a la conclusión que este es un grupo atípico (Minitab, s.f.). De acuerdo a Romero (2016), la prueba K-S es aplicado para comprobar el nivel de significancia empleada en variables cuantitativas continuas cuando el tamaño de la muestra es mayor a 50.

2.1.6.2. Test de Lilliefors (prueba de corrección para Kolmogorov - Smirnov)

En el mayor de los casos, la prueba K-S acepta la hipótesis nula, porque no se sabe el valor de la media y desviación estándar del conjunto de datos, y es una muestra poco utilizada en la práctica, donde se debe estimar la distribución de la teoría comparativa. Para fundamentar este inconveniente, Lilliefors se encargó de tabular la prueba de Kolmogorov-Smirnov para los casos más comunes en los que la media y la varianza de la población son desconocidas y estimadas utilizando datos de la muestra (Romero, 2016).

2.1.6.3. Prueba de Shapiro-Wilks

Esta es una prueba mejor afianzada y con tremendo potencial estadístico entre las que se utilizan en la actualidad (Arcones & Wang, 2006). El análisis estadístico basado en el gráfico de probabilidad que tiene en cuenta la regresión de observaciones sobre el valor esperado de la distribución hipotética, donde el estadístico W simboliza el coeficiente de dos estimaciones de la varianza en una distribución normal (Pedrosa *et al.*, 2015).

Si se presenta que el tamaño de la muestra este por debajo o presenta igualdad a 50 se emplea la prueba de Shapiro-Winks, esto se debe a que muestra una gran variación cuando

cambian tanto la simetría como el tamaño de la muestra de la distribución, generalmente entre 20 y 50 participantes (Romero, 2016; Yazici y Yolacan, 2007).

2.1.6.4. Prueba de Anderson-Darling

Esta prueba se encarga de comparar la función de distribución acumulativa empírica (ECDF) en los datos muestreados con la distribución deseada si los valores presentarían normalidad. Cuando la diferencia obtenida es alta, se rechaza la hipótesis nula de la distribución gaussiana de la población (Minitab, s.f.).

2.1.6.5. Prueba de Ryan-Joiner

Esta prueba se emplea para evaluar la normalidad a partir de la correlación entre los datos y las puntuaciones normales de los datos. Cuando el valor del coeficiente de correlación es contiguo a uno, es factible para la población presentar normalidad. La estadística de Ryan-Joiner estima la fuerza de correlación, cuando es inferior al punto crítico adecuado, refutando la hipótesis nula de distribución normal poblacional. La prueba de Ryan-Joiner se asemeja a la prueba de normalidad de Shapiro-Wilk (Minitab, s.f.).

2.2. Variabilidad espacial de suelos

Durante la formación del suelo interaccionan diferentes procesos como: el clima, material parental, organismos, relieve y tiempo; por ello, la variabilidad o variación de las propiedades del suelo es de carácter natural del mismo. Estas interacciones pueden ser muy variadas debido a que, existen una alta diversidad de suelos (Jaramillo, 2011). Para (Upchurch & Edmonds (1991), asumiendo el origen de error que produce la variación, la variabilidad contiene dos componentes básicos: i) aleatorio o al azar, sin poder vincularse a causas probables y ii) sistemático, puede atribuirse a causas conocidas y previsibles.

La variabilidad puede ser significativa inclusive a escala de parcelas experimentales relativamente pequeñas (Lozano *et al.*, 2004). La variabilidad es influenciada por la propiedad que se estudie, entre las propiedades físicas y químicas, el segundo presenta mayor variación con respecto al primero. Por ello, en la condición natural la variabilidad, que cuando ha sido alterado. Las propiedades más afectadas por el manejo del suelo serán los que sufran un cambio drástico. Además, se encontró que los factores de formación afecta a la variabilidad de las propiedades del suelo (Mulla & Mcbratney, 2001).

Particularmente, en parcelas agrícolas, las variaciones espaciales que presenta las características físicas del suelo son afectados por la acción geomorfológica del suelo, sin

embargo, hay momentos en donde la variación consigue ser afectado por intervención antropogénica (labranzas y otras prácticas de manejo). Aquellos elementos se interrelacionan entre sí mediante secuencias espacio-temporal, pero son alterados de localmente por proceso de erosión y sedimentación (Barrios & Florentino, 2009). Los estudios han confirmado la relación que presenta el rendimiento de los cultivos y la variación en las tres propiedades del suelo físico, químico y biológico perjudican al rendimiento en los cultivos, sin embargo, estas sociedades requieren del rango de variabilidad del parámetro y de las áreas alteradas en la producción, facilitando determinar la variación espacial mejorando actividad de producción así reduciendo los impactos significativos al ambiente (Vargas *et al.*, 2015).

Utilizando las técnicas geoestadísticas se pueden estudiar las variaciones espaciales del suelo, mediante la elaboración de mapas, delimitados áreas en uso diferenciado. “Los suelos presentan variabilidad inclusive en distancias cortas, la variación generada en el resultado de relacionarse entre procesos y factores formadores de suelos” (Andriotti, 2010). Para Jaramillo (2012), los métodos geoestadístico estudia la dependencia espacial de las características del suelo, analizando la semivarianza y el resultado esencial del análisis es el semivariograma.

2.3. Análisis y representación de la distribución espacial (Yost, Uehara, & Fox, 1982)

2.3.1. Semivarianza

De acuerdo a Jaramillo (2012), se conoce por semivarianza a la medida de semejanza presente en las observaciones establecidas a cierta distancia en particular. Numerosos autores afirman que el análisis de semivarianza sugiere que los datos deben presentar distribución normal y cuadráticos (Tragmar *et al.*, 1985), como mínimo tener semejanza en la distribución, esto indica tener similitudes entre los datos, incluso si no se presenta una distribución normal, deben presentar una varianza y una media uniforme en la mayoría de los grupos con distancias específicas. A pesar de ello, se halló ausencia estacionaria en los datos no altera significativamente el análisis de semivarianza (Yost *et al.*, 1982 y Burrough, 1993); para Webster & Oliver (2007) las semivarianzas son más perceptivo a la distribución de datos segadas y la presencia de valores atópicos y/o extremos de ellos.

2.3.2. Semivariograma

Se representa mediante una gráfica de los valores de la semivarianza con proporción a la distancia establecida mediante muestras empleados en un análisis específico. Si se presenta una propiedad que dependa espacialmente, la semivarianza aumenta, a razón que la distancia

aumente a través de muestras y la semivarianza consigue estabilizarse en cierta distancia, logrando tener un semivariograma permanente (Webster & Oliver, 2007). De acuerdo a Jaramillo (2012) se calcula con la siguiente formula:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x_i) - Z(x_i + h)]^2 \dots \dots (1)$$

En la cual $\gamma(h)$ es la semivariograma o semivarianza, $N(h)$ representa los números de pares observados para ser comparados a cierta distancia (>50), $Z(x_i)$ es la estimación de la variable en el punto X y $Z(x_i+h)$ es la estimación de la variable en un punto establecido a un intervalo h del sitio. El mismo autor menciona que, el semivariograma se expande hasta el centro de la distancia máxima en alejamiento de las muestras consideradas, pues la semivarianza se vuelve variable. Por su lado, Webster & Oliver (2007) los semivariogramas se evalúan mejor en pequeñas distancias, deben modelarse para que los algoritmos de estimación brinden soluciones imprescindibles. Los parámetros empleados en la dependencia espacial son:

- **Nugget, efecto pepita o variabilidad aleatoria (Co):** a comparación con la distancia (h), el semivariograma no se aproxima a cero, el efecto nugget muestra discontinuidad del origen al presentar discontinuidad puntual en el semivariograma en distancias menores que la distancia establecida a través de los puntos muestreados. Esta discontinuidad alcanza a ocurrir debido a errores en la medición o a una baja exactitud analítica.
- **Sill, umbral o meseta (Co+C):** Muestra al máximo valor de la semivarianza y deriva del sumatorio del nugget con la variabilidad estructural. Al efectuarse la aparente estacionalidad, la meseta es parecido a la varianza de los datos de la prueba. La meseta representa al valor de la semivarianza lo cual presenta ser constante desde cierta distancia, así que tiende a presentar independencia espacial. Cuando la meseta no es estable, permanece constante a cualquier distancia de la meseta utilizada en el muestreo, lo que explica que la variación espacial del atributo en la región muestreada no puede resolverse, por lo que el modelo lineal es el modelo ajustado más simple. Teóricamente a una distancia de intervalo cero (por ejemplo, rango=0), el valor del semivariograma es 0. No obstante, a intervalos inferiores al infinito, el gráfico de la mitad de h generalmente resulta ser un efecto nugget, un valor superior a 0. Por
- **Variabilidad estructural (C):** indica la cantidad de varianza de datos que aumenta hasta que no hay similitud entre las varianzas de las muestras.

- **Rango o alcance (a):** Suele ser la distancia de los valores del semivariograma donde son estables, el modelo inicia a formar un plano y las muestras tienen una dependencia espacial. Los sitios de las muestras separados por distancias pequeñas que el rango se correlacionaron espacialmente automáticamente, en tanto los sitios fuera de banda no se correlacionaron espacialmente.

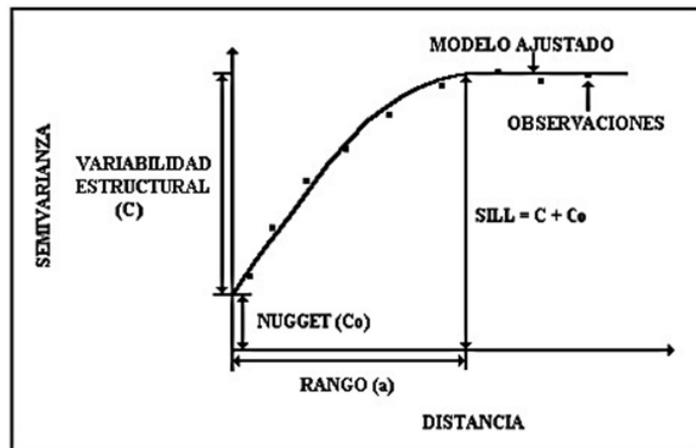


Figura 1. Estructura del semivariograma. Adaptado de Jaramillo (2012)

2.3.3. Modelos de semivariograma

De acuerdo a ESRI (s.f.), el Kriging es una herramienta que nos brinda cuatro funciones para seleccionar un modelo del semivariograma empírico: Circular, lineal, esférico, gaussiano y exponencial.

De acuerdo al modelo elegido se ve afectado en la estimación de los valores inciertos, especialmente al formarse la curva cerca al punto de origen es relevantemente diferente. Cuando la curva de origen esté más inclinada que la curva cerca del origen, mayor será la influencia de los vecinos cercanos en la predicción. A raíz de ello, la superficie de salida será menos uniforme. Cada uno de los modelos está programado para adaptarse a diferentes fenómenos de mayor precisión.

2.3.4. Interpolación

La interpolación espacial es una técnica que calcula el valor de una determinada variable $f(x)$ (como las propiedades del suelo), absteniéndose de observaciones, con el valor conocido de la función de un cierto valor específico de los puntos circundantes (Blanco, 2015). Así, el análisis de la dependencia espacial en los valores cuantifica las correlaciones o frecuencia de información a través de valores proporcionados en distintos puntos, la cual determina el tamaño

de tamaño de la muestra “área de influencia”. El menor o mayor grado de continuidad y regularidad espacial de las variables regionalizadas se revela mediante instrumentos sencillos de interpretar. Estudiar en diferentes orientaciones espaciales nos permite descubrir posibles anisotropías, lo que sugiere que la región se encuentra bien estructurada en ciertas direcciones a diferencia del resto. De esa manera, circunstancialmente se conseguirá comprender el fenómeno regionalizado, al exponer los diferentes procesos que influyeron en el fenómeno estudiado en diversas series espaciotemporales (Emery, 2013). Para la interpolación los métodos estarán relacionados basándose en 3 datos para el análisis, conforme se mencionó arriba, empleando “X y Y” para encontrar al punto y Z como el parámetro a investigar, es fundamental tomar en cuenta analizar las hipersuperficies con fines de investigaciones reales. Por cierto, las hipersuperficies emplean x, y, z para determinar donde se ubica el punto, asimismo con una cuarta variable para expresar el parámetro de estudio. De acuerdo con estas consideraciones, el alcance de los métodos presentes para las hipersuperficies es muy limitado: implementándose comúnmente en Kriging e IDW (Ferreira, 2005; Rusu, 2004).

2.3.5. Método Kriging

Kriging es una técnica geoestadística avanzada generando superficies lisas calculados en función de unas series de puntos dispersos a partir de valores z. Emplearlo implica un estudio interactivo en base a cómo se comporta el fenómeno espacial dado por los valores “z” antes de elegir que método se usara para calcular las superficies de salida (ESRI, s.f.). El método Kriging utiliza una medida de autocorrelación espacial entre dos variables, de modo que los valores varíen mediante la disposición espacial de las muestras. La presente hipótesis asume que la variabilidad espacial de la cantidad expresada consigue explicarse, aunque sea de manera parcial, por la función de autocorrelación espacial: la variabilidad espacial del valor z es consistente con los valores contiguos acorde con un rango homogéneo de funciones (Ferreira, 2005). Christensen (1991) menciona que este método está construido de tal manera que proporciona ser el mejor estimador lineal no sesgado con una varianza mínima. El propósito de la estimación es predecir los valores desconocidos en variables espaciales o regionalizadas respaldado con los valores conocidos de ciertas variables.

Al estimar por el método de Kriging nos proporciona desintegrar los valores exactos y favorece al estimar el error en la distribución espacial, puesto que el método del análisis proporcione la información en base de la dependencia y continuidad espacial de la variable para ser estudiada. Esta herramienta se basa en la técnica geoestadística que es el variograma experimental, calculada con los pares de datos con distintas distancias de separación, y se adapta

al modelo teórico de variograma, donde las que se emplean concurridamente el lineal, el esférico y el de gauss (Regalado & Ritter, 2005). Los parámetros examinados del variograma determinan la estructura de la autocorrelación espacial de las variables, son los parámetros que calculan los valores de los puntos que se utilizaran para interpolar (Matheron, 1971). Se tiene:

- **Kriging ordinario (KO):** Donde se asume que la medida es también constante, pero desconocida. El Kriging Ordinario (OK) considera las posibles variaciones locales de dirección o media, lo que limita la influencia de estacionalidad de la media contigua local. No hay forma de decidir, basándose únicamente en los datos, si el patrón observado es el resultado de la autocorrelación, entre los errores $\varepsilon(\mathbf{s})$ con μ constante, o la tendencia, con $\mu(\mathbf{s})$ cambiando con \mathbf{s} .
- **Kriging simple (KS):** Se fundamenta en la hipótesis en donde se conoce la media de la función aleatorio. De manera similar conforme se determina en los modelos lineales, para este caso el modelo será igual al promedio incluido el sesgo aleatorio con promedio cero. Por consiguiente, las diferencias de los sesgos no son independientes. Por tal sentido no hay limitaciones en las ponderaciones que tienden a cumplir la condición de insesgadez.
- **Kriging universal (KU):** Establece que la media local es desconocida y cambia gradualmente en cada vecindad local $W(\mathbf{u})$. El componente de dirección se modela como un conjunto lineal de funciones $f(\mathbf{u})$ de las coordenadas. Para manejar esta clase de variables, es común alterar la variable $Z(\mathbf{u})$ a un aumento de tendencia, utilizado como una función determinista, además de un componente aleatorio constante con promedio cero.

2.3.6. Método Distancia Inversa Ponderada (IDW)

Este instrumento IDW emplea la interpolación como el método para estimar los valores de las celdas, promediando los valores de los puntos de datos de muestras contiguas a cada celda procesada. Cuanto más cercano este un punto del centro de la celda a estimar, mayor influencia o peso habrá en el procesamiento del cálculo promedio (ESRI, s.f.).

El IDW es un método de interpolación no paramétrica otorga más peso a los valores más cercano al punto, es decir el punto más cercano recibe más peso que el punto lejano. El peso es proporcional al recíproco de la distancia elevada a la potencia de p , por lo que el peso disminuye rápidamente a medida que aumente la distancia. Habitualmente, emplea un valor de $p = 2$, escogiendo el método de interpolación con ponderación cuadrática inversa a la distancia (Longley *et al.*, 2005pro).

2.4. Validación cruzada

Evalúa la calidad relativa de la cuadrícula calculando e investigando los errores de la cuadrícula teniendo en cuenta los valores conocidos de las “N” observaciones de los datos iniciales. Estos errores se calculan eliminando la primera observación del conjunto de datos original e interpolando el valor de esa primera observación utilizando el resto de los datos y el algoritmo específico. Utilizando las observaciones conocidas en este punto, el error de interpolación se procesa de la siguiente manera:

$$\text{Error} = \text{Valor estimado} - \text{Valor original}$$

Posteriormente, la observación inicial eliminada es introducida al conjunto de datos y la observación siguiente es destituido de este conjunto de datos. Luego, utilizando los datos sobrantes (incorporando la observación inicial), a parte de un algoritmo específico, cierto valor es utilizado en la interpolación para la otra observación. Empleando el valor conocido en este caso, el error de la interpolación se calcula según lo especificado anteriormente. La segunda observación se vuelve a ingresar al conjunto de datos y el proceso se continúa de este modo para la tercera, cuarta, quinta, etc. observación. Este proceso eventualmente produce n errores de interpolación. Se pueden utilizar distintas estadísticas como medidas cuantitativas, lo que consiente calcular la calidad del método gridding (Ferreira, 2005).

Los resultados de las investigaciones de la validación cruzada tienen que centrarse en los defectos, como errores excesivos o áreas claramente sobreestimados. No se recomienda usar los residuos de la validación cruzada para mejorar automáticamente los modelos de semivariograma, por lo que dará como resultado a un modelo “optimizado” (Isaaks y Srivastava, 1989).

2.5. Propiedades físicas del suelo

2.5.1. Textura del suelo

Este parámetro hace referencia a la distribución porcentual de las proporciones relativas en arena, limo y arcilla presentes en el suelo; Zavaleta (1992) exceptúa a partículas minerales mayores a 2 mm de diámetro (arena), considerando como modificación textural para las siguientes categorías: grava de 0.2 a 2 cm, grava de 2 a 5 cm, guijarros de 15 a 25 cm, rodador de 25 a 50 cm y los bloques superiores a los 50 cm; se incluyen dentro de este set a agregados constantes como consecuencia de la materia orgánica.

$$\text{Arena \%} + \text{Limo \%} + \text{Arcilla \%} = 100 \%$$

La distribución del diámetro de las partículas forma la textura del suelo. Como resultado, tiene mayor influencia en las características del suelo, en la temperatura, la estructura, la formación de aglomerados, la adhesión del suelo, la retención de agua y la permeabilidad (Ayra y Paris, 1981). Zavaleta (1992) clasifican a los suelos en doce clases texturales consideradas de acuerdo al aumento de la fracción fina, teniéndose:

Tabla 1. Clasificación textural de suelos

Grupo textural	Denominación	Clase textural
Arenoso	Textura gruesa	Arenas
		Arenas francas
		Franco arenoso
Franco	Textura moderadamente gruesa	Franco arenoso fino
		Franco arenoso muy fino
		Franco
Franco	Textura media	Franco limoso
		Limoso
		Franco arcilloso
Arcilloso	Suelos de textura fina	Franco arcilloso arenoso
		Franco arcilloso limoso
		Arcilloso arenoso
Arcilloso	Suelos de textura fina	Arcilloso limoso
		Arcilloso
		Arcilloso

Fuente: Adaptado de Zavaleta (1992)

2.5.2. Densidad aparente

La densidad aparente es un indicador de la compactación del suelo, se calcula como el peso seco del suelo dividido por su volumen expresado en g/cm^3 . Es dependiente de la textura del suelo y las densidades de los minerales del suelo (arena, arcilla y limo) y partículas de materia orgánica. La densidad aparente generalmente aumenta con la profundidad del suelo pues las capas subterráneas presentan una reducida materia orgánica (Rawls, 1983; Nemes & Rawls, 2004).

2.5.3. Porosidad

Este parámetro indica el porcentaje de la fracción del volumen total del suelo en su medio originario no ocupado por partículas minerales, sólidas y orgánicas (Narro, 1994). Para Ruiz *et al.* (2009) la porosidad indica el estado del suelo porque representa su capacidad acumular agua y accesible al intercambio físico, químico y biológico entre las diferentes fases del suelo.

2.5.4. Resistencia a la penetración

La resistencia a la penetración (RP) del suelo indica el grado de compactación, al reducir el crecimiento de las raíces de las vegetaciones. La RP presenta característica física que mide el comportamiento y el efecto de varias características del suelo, como la densidad aparente, porcentaje de humedad, la estructura y el contenido de materia orgánica y mineral del suelo (Soane *et al.*, 1980).

2.6. Propiedades químicas del suelo

Las propiedades químicas del suelo involucran una medición de las reacciones del suelo (pH) y los elementos químicos (nutrientes). Este análisis es crucial a fin de mejorar la gestión de la nutrición vegetal, eligiendo los cultivos óptimos y obteniendo mejor rendimiento de cosecha (Cepeda, 1991).

2.6.1. El pH

Fassbender (1987) refiere que las reacciones del suelo son una de las características químicas más relevantes del suelo, como medio de sostén de diversos cultivos y coberturas naturales se mide a través del pH. Presenta un efecto indirecto, debido a que presenta influencia determinante en la disponibilidad en la mayor parte de los nutrientes, en las propiedades químicas y biológicas del suelo.

La escala de pH se emplea para indicar el grado de contenido de los iones hidrógeno en el suelo. El pH se expresa en una serie logarítmica OH^- , con el signo cambiado, se expresa en moles/L. Si el suelo tiene un mayor contenido de iones hidrógeno, es considerado ácido y cuando tiene un menor contenido es considerado básico. Este parámetro controla varias reacciones químicas y biológicas que suceden en el suelo presentando un efecto indirecto en el crecimiento del cultivo. Dependiendo del pH del suelo, se puede preferir la presencia de algunos nutrientes. El pH es el resultado del clima, vegetación e hidrología en donde se formó el suelo. El pH de cierto estrato del suelo es perjudicado por la regolita, la precipitación, manejo de los suelos y las actividades de los individuos (plantas, animales y microorganismos) que habitan en el suelo (Santibáñez, s.f.).

Para la AEFA (s.f.) dependiendo de la escala de pH del suelo, los nutrientes pueden o no estar disponibles para las plantas, e incluso puede influir en su toxicidad.

Tabla 2. Clasificación de los niveles de pH en los suelos.

Nivel	pH
Extremadamente ácido	<4.5
Fuertemente ácido	4.5 - 5.5
Medianamente ácido	5.6 - 6
Ligeramente ácido	6.1 - 6.6
Neutro	6.6 - 7.3
Medianamente básico	7.4 - 7.8
Básico	7.9 - 8.4
Ligeramente alcalino	8.5 - 9
Alcalino	9.1 - 10
Fuertemente alcalino	>10

Fuente: Adaptado de Rivera *et al.* (2018)

2.6.2. Materia orgánica

La materia orgánica, es considerado como una compleja mezcla y variada de materias orgánicas, juegan un papel crucial en los suelos agrícolas. Aunque conforma una pequeña parte de la mayoría de los tipos de suelos, es un elemento dinámico que tiene una influencia dominante en las propiedades y procesos del suelo. Habitualmente un efecto conlleva a otro, de manera que, de la adición de materia orgánica al suelo conduce a una compleja cadena de beneficios (Corbella y Fernández, s.f.).

Varios autores se refieren explícitamente a la materia orgánica o humus a la fracción orgánica que cumple un rol fundamental en los suelos. Es inexistente un significado para el “humus” donde estén de acuerdo los experimentados en la materia; pero frecuentemente el vocablo humus es aludido a “diferentes sustancias orgánicas, pardas y negras, resultantes de la descomposición de materia orgánica de origen vegetal principalmente”. Incluye un aproximado al 5 % de nitrógeno, en consecuencia, su valor en el suelo puede hallarse multiplicando el contenido del nitrógeno total por 20 (Gros y Domínguez, 1992).

Tabla 3. Clasificación de suelos según el nivel de materia orgánica

Clasificación	Contenido de M.O.
Pobre	< 2%
Medio	2 – 4%
Rico	> 4%

Fuente: Benzing (2001)

2.6.3. Nutrientes

Los nutrientes de las plantas son los componentes químicos que las plantas requieren en mayor o en menor medida para su crecimiento, suelen ser absorbidos por el suelo a través del sistema radical incluso a través del aire por el sistema vascular. En consecuencia, el crecimiento exacto del cultivo depende de la composición nutricional del suelo. Sin embargo, la dosis de nutrientes suministrados al suelo depende de la composición química del suelo y también de factores tales como el clima zonal, la estructura física, existencia de cultivos pasados y actuales y la actividad microbiana. En consecuencia, con cierto análisis se puede calcular la dosis de fertilizantes que se agregara.

2.6.3.1. Nitrógeno

El nitrógeno (N) es el elemento más abundante en la atmósfera y suele ser el nutriente más limitante para los cultivos. El nitrógeno circula a través del suelo en varios procesos y formas. Algunos procesos son necesarios para convertir N en formas que las plantas pueden utilizar. Algunos procesos pueden provocar pérdidas de N, como la lixiviación o la volatilización. El nitrógeno es agregado al suelo naturalmente a partir de la fijación de N por bacterias y leguminosas del suelo y a través de la deposición atmosférica en lluvia. Por lo general, se suministra N adicional al cultivo mediante fertilizantes, estiércol u otros materiales orgánicos (USDA, 2015).

Tabla 3. Clasificación de suelos de acuerdo al nivel de nitrógeno

Clasificación	Contenido de N
Bajo	< 0.10%
Medio	0.10 – 0.20%
Alto	> 0.20%

Fuente: Benzing (2001)

2.6.3.2. Fósforo

El fósforo (P), junto al nitrógeno, suele ser el nutriente más limitante para la producción de cultivos y forraje. El papel principal del fósforo en una planta es almacenar y transferir energía producida por la fotosíntesis para su uso en procesos de crecimiento y reproducción. El P del suelo cicla en una variedad de formas en el suelo. Niveles adecuados de P promueve el crecimiento de las raíces y la resistencia al invierno, estimular el macollamiento y acelerar la madurez. Niveles de prueba de suelo de fosfato son un excelente indicador del ciclo del fósforo en los suelos y son un índice de la probabilidad de respuesta del cultivo a los fertilizantes fosforados (USDA, 2014).

Tabla 4. Clasificación de suelos de acuerdo al nivel de fósforo

Clasificación	Contenido de P
Bajo	< 7 ppm
Medio	7 – 14 ppm
Alto	> 14 ppm

Fuente: Benzing (2001)

2.6.3.3. El potasio en el suelo

De acuerdo a Mengel y Kirkby (1987) es un nutriente principal para la mayoría de organismos vivos. Las plantas requieren grandes dosis de nutriente, similares a los requerimientos del nitrógeno. Se encuentran en todos sus órganos de las plantas moviéndose sencillamente de un lado a otro. Desempeña un rol fundamental para activar las enzimas (se sabe que más de 60 enzimas son activadas por este catión), las cuales son activadas en diferentes procesos metabólicos como la fotosíntesis, biosíntesis proteica y carbohidratos; incluso presenta un efecto sobre el equilibrio hídrico y el crecimiento vegetal. Al intervenir de ciertos procesos metabólicos, el K promueve el desarrollo de la planta, el fructificación, la maduración y el estado de los frutos. Las plantas obtienen K de los fertilizantes, erosión mineral, mineralización de los desechos orgánicos o del estiércol. El proceso de formación del suelo actúa sobre las sustancias presentes en el suelo, restaurando más o menos la disponibilidad de nutrientes

Tabla 5. Clasificación de suelos de acuerdo al nivel de potasio

Clasificación	Contenido de K₂O
Muy bajo	< 300 ppm
Bajo	300 – 600 ppm
Normal	> 600 ppm

Fuente: Benzing (2001)

2.7. Antecedentes de estudio

Existen diversos estudios en relación a la aplicación de los SIG para investigar la variabilidad de suelos bajo diferentes tipos de suelo, teniéndose principalmente:

La tesis de Déleg (2018); plantea como objetivo principal “determinar la variabilidad espacial de las propiedades físicas del suelo en la parcela experimental de Irquis Ecuador”. Uso dos métodos de interpolación el KO y el IDW, a cada método se realizaron una “Validación Cruzada” para validarlo. Los resultados alcanzados presentaron diferencias para la densidad

aparente, materia orgánica y arena, limo y arcilla. Obtuvo bajos valores estadísticos para el KO en la validación cruzada, además presento altos valores en la predicción. Por otro lado, el método IDW genero áreas aisladas en algunas variables.

La investigación de Arciniegas y Gómez (2018), donde se plantean determinar la “Variabilidad espacial de algunas propiedades físicas y químicas en los suelos con diferentes sistemas de manejo”; obtuvieron 24 puntos mediante un muestreo sistemático para analizar la variabilidad espacial de ciertas propiedades físicas (DA y el CBR) y químicos (M.O., pH del H₂O y KCl y P) del suelo con el método Kriging. Encontraron variabilidad espacial en la densidad aparente y el pH en los suelos estudiados.

Vargas *et al.* (2016) en su investigación “Variabilidad espacial de algunas propiedades físicas de un suelo Fluventic Ustropepts en la cuenca bajo del río Las Ceibas – Huila”. Realizo 37 puntos de muestreo con una separación de 50x50 m para análisis físicos, de infiltración y químico en 6.5 ha. Para el análisis infiltración obtuvo un suelo extremadamente heterogéneo con un CV de 74.5 % además de una dependencia espacial moderada con un radio de alcance de 610.9 m

López (2016), en su investigación “Distribución espacial de las propiedades químicas de los suelos en el Distrito de Riego RUT”, usando los métodos Kriging Ordinario y IDW para la interpolación usando la herramienta “validación cruzada”. Las propiedades químicas analizadas son CE, pH, Ca²⁺, Mg²⁺, Na⁺, K⁺, CIC, PSI y PMgl. Se encontraron bases intercambiables en altas cantidades, pero en desequilibrio iónico, ocasionando antagonismo, además se presentaron 55 % en los niveles medios de Magnesio intercambiable, las mayores afectaciones por magnesio intercambiable se distribuyeron esencialmente en la zona centro cuyas afectaciones guardaron relación con los mapas de las relaciones Ca²⁺/Mg²⁺ invertidas y con las del porcentaje de saturación de Mg²⁺.

El estudio de Blanco (2015) denominado “Estudio de la distribución espacial y cartográfica digital de algunas propiedades físicas, químicas e hidrodinámicas de suelos en la Cuenca del Segura”, obtuvo un total de 181 variables para interpolarlo por el método de Kriging Ordinario y ser validado por la validación cruzada. Obtuvieron un mejor resultado el contenido de carbono orgánico y carbonato cálcico además presentaron excelente estructura espacial, en tanto las fracciones granulométricas lograron modelos con altos valores de error y bajas correlaciones y estructura espacial de los residuos.

En su tesis, Soto (2016) “Distribución espacial de las propiedades físicas y químicas de los suelos por unidades fisiográficas en la microcuenca las pavas, distrito Mariano Dámaso Beraún – Las Palmas” realizó el muestreo en once unidades fisiográficas. Obteniendo predominancia de texturas francas y franco arenoso, niveles de pH de fuerte a moderadamente ácido y neutro con un contenido medio a alto de materia orgánica, moderado a alto de nitrógeno, alto de fósforo, alto de calcio, moderado de magnesio y moderado a muy bajo de potasio.

Gonzales (2015), en su investigación “Distribución espacial por unidades fisiográficas, las propiedades físicas y químicas de los suelos con Palma Aceitera (*Eleaieis guineensis Jacq*), Nueva Requena – Ucayali” usando el método Kriging en las 60 muestras. Del resultado de la caracterización e interpretación presento suelos con textura franco arcillo arenoso a franco, pH altamente ácido, contenido medio a bajo en materia orgánica, nivel medio abajo en nitrógeno, nivel muy bajo en óxido de potasio, capacidad de intercambio catiónico efectiva o potencial de nutrientes y bases cambiables es bajo.

Villacorta (2014), en su tesis de pregrado “Distribucion espacial de las propiedades físicas y químicas del suelo de los palmicultores de Shambillo”, recolecto 150 muestras del suelo y uso el método de interpolación Kriging. Obtuvo que los suelos de los palmicultores muestran niveles muy variables para el contenido de materia orgánica y nitrógeno mientras para el fósforo y potasio muestran niveles bajos; la clase textural franco se determinó en un 62%, mientras que el franco arenoso alcanzó un 36.67% de las muestras.

Zúñiga (2007), en su investigación “Caracterización y distribución espacial de suelos aluviales hidromórficos con palma aceitera (*Elaeis guineensis Jacq.*) En palma del espino”, obtuvo un total de 196 y 93 muestras a nivel superficial y subsuperficial muestreados con una separación de 1000x250 m en dirección oeste-este y sur-norte para ser interpolados con el método Kriging. Caracterizo algunas propiedades como el: pH, N, P, K, Mg, CE, arena, limo y arcilla. Presentaron coeficientes de variación bajos para el pH, N y CE, medios para Mg y altos para P, K, arena, limo y arcilla. El análisis geoestadístico, indica que, aunque existe de moderada a fuerte dependencia espacial, esta es completamente isotrópica y predominantemente por encima del efecto puramente de la variancia (efecto pepita).

III. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Lugar de ejecución

3.1.1. Ubicación

La siguiente investigación se llevó a cabo en una parcela productiva de *Elaeis guineensis* Jacq. (palma aceitera) de 11,48 has; este predio está ubicado aproximadamente a 6,5 km de la ciudad de Tocache, en el lugar de Nueva Libertad, distrito y provincia de Tocache - San Martín.

Las coordenadas geográficas del predio son:

Latitud	: 8° 14' 7.72" S
Longitud	: 76° 32' 50.07" O
Altitud	: 547.00 m.s.n.m

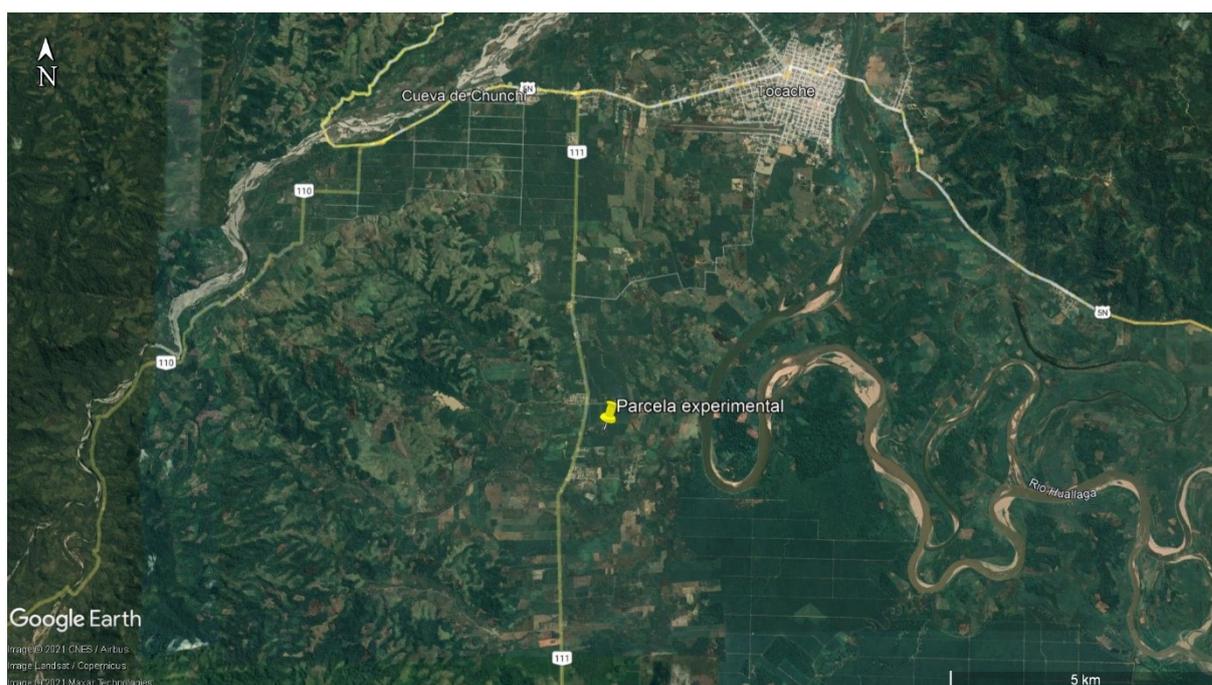


Figura 2. Ubicación del área de experimento

3.1.2. Acceso

El ingreso a la zona de investigación es por medio terrestre, dándose inicio en la ciudad de Tocache sobre la carretera Fernando Belaunde Terry con un recorrido de 2.5 Km, luego hacia la margen izquierda de la vía, a través del desvío a la carretera afirmada que conduce a la localidad de Nueva Libertad con un recorrido de 4 Km.

3.1.3. Características generales del área en investigación

3.1.3.1. Clima

El registro meteorológico histórico de la estación Tocache, registra que la zona de interés presenta un valor promedio en la temperatura de 25°C, humedad relativa de 87% con una precipitación anual de 2560 mm, característico de un clima tropical. El mes con mayor sequía es julio, con 119 mm de lluvia. La mayor precipitación ocurre en noviembre, con un promedio de 294 mm enero es el mes más caluroso del año. La temperatura en enero promedio es 25,2 °C. Las temperaturas más bajas se presentan en julio, cuando oscila entre 23,8 °C.

3.1.3.2. Topografía

La topografía de la zona de estudio es plana y ondulada, con zonas conformadas por terrazas bajas y medias próximas a ríos y quebradas del lugar.

3.1.3.3. Suelos

En la zona de estudio preexisten suelos con características edafológicas que son aluviales, adecuadas para cultivos temporales como el arroz (en bajo riego), el plátano (tipo isla) frutales, pastos y unos cultivos perennes incluido el cacao, especies forestal y oriundos de la zona, ya que presenta alto porcentaje de contenido orgánico y presenta pH de 6.0.

3.1.3.4. Cultivo de palma

En el ámbito de estudio, la palma es una alternativa de excelentes perspectivas económicas. Este cultivo presenta importantes rendimientos, con esto, los problemas en el cultivo que se presentan últimamente son muy variados ya que esto depende de muchos factores como control cultural, manejo de plagas y enfermedades bajo rendimiento en la producción, inadecuada aplicación de fertilizantes de acuerdo al periodo fenológico del cultivo. Sin embargo, todo esto se debe basar en un análisis e interpretación de los resultados para ver espacialmente como están distribuidos los nutrientes en el suelo y mediante eso aplicar la cantidad necesaria de fertilizantes al cultivo, y así desarrollara una herramienta para los palmicultores y obtener mejores resultados en la producción de palma aceitera.

3.2. Materiales y métodos

3.2.1. Materiales y equipos

En esta investigación consto en la etapa de recolección de muestras en el campo y para las muestras del suelo, se necesito de 01 pala plana, 01 pala de jardinería, 01 cinta métrica, 01 barreno muestreador de suelo de 50 cm, 01 balde de 1 galón, 50 bolsas plásticas de ¼”, 50 etiquetas, 01 rollo de cinta de embalaje, 250 m de cordel graduado, 30 estacas de 40 cm, 01

GPS, 01 laptop, 01 cámara fotográfica y 50 fichas de perfil de suelo. Asimismo, para el análisis de las muestras se requirió de equipos de laboratorio y diversos reactivos.

3.2.2. Metodología

En líneas generales, se aplicó los Sistemas de Información Geográfica (SIG) para determinar la distribución espacial que presenta las propiedades fisicoquímicas del suelo en estudio, se consideró caracterizar los parámetros fisicoquímicos de las muestras representativas; posteriormente, realizar el modelamiento geoestadístico de la distribución espacial y, por último, determinar la validez de los mapas de distribución.

3.2.2.1. Tipo de investigación

Corresponde a una investigación aplicada de nivel descriptivo-correlacional, toda vez que se pretende obtener el mejor modelo geoespacial (generalización) que represente la distribución de las propiedades fisicoquímicas del suelo mediante técnicas de interpolación, con relación al distanciamiento y las variables estudiadas por parcela de cultivo de palma aceitera.

3.2.2.2. Variables en estudio

Respecto a las variables en estudio, se tiene que, las unidades experimentales fueron las muestras de suelo recolectadas durante los recorridos, a partir de ello se tiene:

- **Independientes**
 - El distanciamiento de los puntos de muestreo.
- **Dependientes**
 - pH, materia orgánica (M.O.), nitrógeno (N), fósforo (P) y potasio (K)

3.2.2.3. Analizar los datos espaciales de las propiedades químicas del suelo

- **Ubicación del predio de cultivo de palma aceitera**

Se delimitó el área definitiva de estudio, teniéndose una superficie de 11,48 has del cultivo de palma aceitera de 10 años en producción, estableciéndose, entre los límites del predio, la disposición del cultivo y distanciamientos de este, relieve del terreno, calles, drenaje, entre otros, posteriormente se determinó el número de muestras necesarias. En el Anexo 3 se especifica el mapa de ubicación del área de producción con palma aceitera.

- **Planimetría y altimetría del predio**

La planimetría y altimetría de la parcela con palma aceitera, se obtuvieron con una estación total, tomando en consideración la disposición del terreno, relieve y distribución del cultivo de palma dentro del área en estudio.

- **Unidades de muestro para la interpolación y validación**

Una vez establecidos los hitos del predio, entre cordeles se fijaron los límites de la parcela; posteriormente, con el apoyo del receptor GPS, se identificaron las unidades de muestreo a partir de la distribución aleatoria de 30 puntos de muestreo en toda la superficie de la parcela. Se consideró un primer grupo de 15 muestras separadas a una distancia superior a 50 m; este grupo de muestras conformaron los datos para el análisis de interpolación. En seguida y de forma independiente al muestreo anterior, se consideran las otras 15 muestras (segundo grupo de datos) en puntos distribuidos aleatoriamente en el área de investigación, estas muestras se recolectaron a fin de confrontarlos con valores esperados del análisis de interpolación mediante el método de validación en campo a una distancia definida menos de 50 m. Considerando la técnica geoestadística, la razón primordial fue tener los puntos distribuidos de forma constante (Figura 3).

- **Muestreo y análisis fisicoquímico de las muestras de suelo**

Después de identificar los puntos de muestreo, con la ayuda de un machete, se limpió la superficie del punto, removiendo los residuos vegetales y cobertura del suelo. Por cada unidad se recolectaron 01 muestra de suelo a 20 cm de profundidad utilizando el muestreador, las muestras húmedas se dejaron orear bajo sombra para su posterior empaquetado. Las muestras obtenidas se rotularon y codificaron, indicando la nomenclatura correspondiente, el tipo de muestra que ocupa, las coordenadas de ubicación en el plano, entre otros, finalmente se almacenaron en un costal. Las 30 muestras de suelo (50 % interpolación y 50 % validación) se trasladaron al Laboratorio de agua y suelos de la Facultad de Agronomía de la UNAS, para ser sometidas a un análisis de caracterización de las variables: pH (1:1), materia orgánica (%), nitrógeno (%), fósforo (ppm) y potasio (ppm). Así, las muestras fueron secadas a temperatura ambiente bajo techo durante 24 horas, para luego tamizar con una malla de 2 mm; posteriormente, se aplicaron los métodos para el análisis fisicoquímico (Tabla 6).

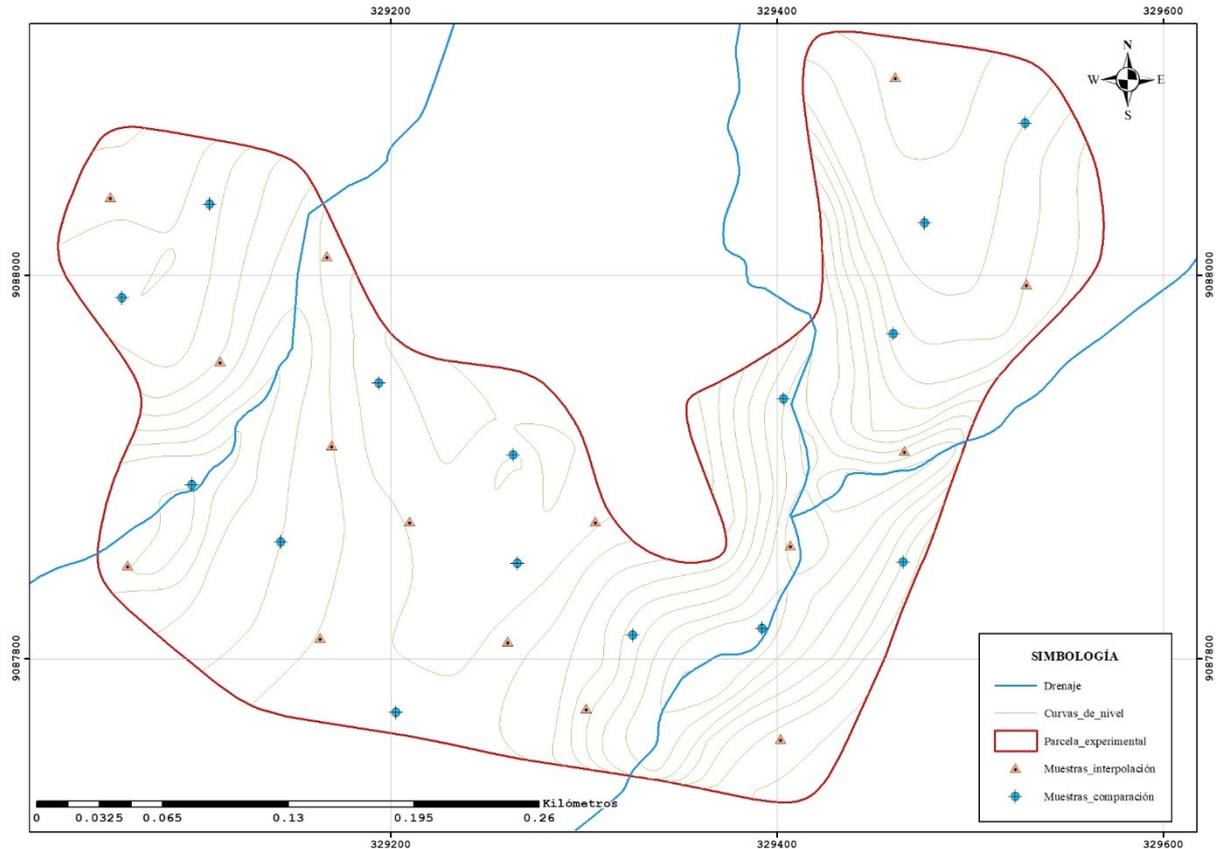


Figura 3. Unidades de muestreo del suelo en la parcela con producción de palma aceitera

Tabla 6. Métodos empleados para analizar los parámetros físico y químico del suelo

Variable	Métodos de análisis
pH	Potenciómetro
Materia Orgánica	Walkley Black
Nitrógeno	Kjeldahl
Fosforo	Bray y Kurtz
Potasio	Morgan Modificado

Fuente Laboratorio de agua y suelos de la Facultad de Agronomía de la UNAS

• Análisis exploratorio

A partir de las muestras debidamente ubicadas en coordenadas rectangulares de tres dimensiones (x, y, z) con un distanciamiento definido entre unidades de muestreo, se determinaron los principales estadísticos (promedio, desviación estándar, varianza y coeficiente de variación, etc.) a cada una de las variables en estudio para su interpretación inmediata; asimismo, para observar la posición y variación con las medias de tendencia central y desviación de los datos observados se presentaron diagramas de cajas.

A través de la Prueba de Normalidad (NP) de Shapiro-Wilks con un nivel de probabilidad al 5%, a los datos obtenido se realizó la comparación de distribución normal. En

el caso que no existe distribución normal se transformaron los datos siguiendo las recomendaciones de Webster & Oliver (1990) con el propósito de que sus frecuencias de posición se ordenen simétricamente a una curva normal.

El mapa de Voronoi se utilizan para identificar el área más asociado con los puntos de muestreo, de tal forma que a cada punto se le asigna la región formada entre ellos, generado a partir de las mediatrices de los puntos. Con la tendencia en el plano “XZ” y “ZY” nos permite saber que tendencia presenta nuestros datos (lineal, cuadrática, cubica y polinómica). La semivarianza muestra. La semivarianza representa la relación que hay entre cada uno de los puntos de las muestras, a mayor semivarianza existirá una heterogeneidad espacial.

3.2.2.4. Modelamiento geoestadístico de la distribución espacial

Primero se realizó una división del 50 % de nuestro conjunto de datos con la extensión Geostatistical Analyst usando la herramienta Subset Features en dos muestras, la primera muestra de interpolación, con la cual se realizó el modelo de interpolación y otra muestra para la validación, por la cual se validará el método de interpolación. Se realizó las divisiones de datos hasta obtener una normalización gaussiana para la muestra de interpolación.

- **Kriging ordinario (KO)**

Una vez realizada la normalización de la base de datos, se procedió al diseño de los variogramas de cada parámetro químico (pH, M.O., N, P y K), estableciendo los parámetros de cada modelo de semivariograma teórico (esférico, circular, gaussiano y exponencial).

Para hallar los parámetros del variograma experimental para cada uno de los parámetros químicos se hizo con un intervalo de distancia de 30 m (lag size) y una tolerancia en la dirección total ($0^\circ \pm 90^\circ$).

Tabla 7. Parámetros del variograma

Parámetros del variograma
Efecto pipeta (Nugget)
Alcance (Rango)
Umbrall (Sill)

- **Interpolación con la Distancia Inversa Ponderada (IDW)**

A diferencia del método anterior, en este método no emplea modelos teóricos de semivariograma, además no se generan los parámetros del semivariograma (tabla 8), se empleó una tolerancia en la dirección total ($0^\circ \pm 90^\circ$).

Para la selección del modelo, se consideró que la meseta del semivariograma debe ser igual a la varianza de los datos y en el caso de modelar con datos normalizados por anamorfosis gaussiana, la meseta debe ser 1. Posteriormente se validó el modelo en base a los criterios de la Tabla

3.2.2.5. Validar los modelos de distribución espacial de las propiedades químicas de KO y IDW

- Medidas de evaluación del modelo

En la tabla 8 se observan las medidas de evaluación que se emplearon.

Tabla 8. Medidas de evaluación del modelo.

Criterios	Formulas
Error medio (EM)	$\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\gamma_i - \hat{\gamma}_i)$
Error absoluto medio (EAM)	$\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \gamma_i - \hat{\gamma}_i $
Error cuadrático medio (MSE)	$\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\gamma_i - \hat{\gamma}_i)^2$
coeficiente de determinación (R^2)	$\frac{\sum_{i=1}^n (\gamma_i - \hat{\gamma}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (\gamma_i - \bar{\gamma})^2}$

- Elección del modelo a representar

Posteriormente se validó el modelo en base a los criterios de la Tabla 9.

Tabla 9. Elección del modelo.

Criterio	Condición para ser valido
Error medio (EM)	Cercano a 0
Error absoluto medio (EAM)	Cercano a 0
Error cuadrático medio (RMSE)	Valor muy pequeño

coeficiente de determinación (R^2)

Cercano a 1

- Validación de la interpolación

Con el propósito de validar los mapas obtenidos a través del análisis de interpolación, se aplicó una técnica propuesta por Henríquez *et al.* (2013). Consistió en la “validación de campo” utilizando el segundo grupo de datos recolectados (validación), la cual consistió en confrontar los valores obtenidos en el muestreo de verificación ejecutado en distintos puntos con los que se obtuvieron producto de la interpolación en esos mismos puntos.

Tabla 10. Validación de la interpolación.

Validación de campo	Condición para ser valido
Eficiencia de predicción (E)	Cercano a 15
Correlación de Pearson (r)	$0.2 \leq r < 1$

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Analizar los datos espaciales de las propiedades químicas del suelo.

4.1.1. Estadística descriptiva

La Tabla 7 detalla los resultados de la estadística descriptiva del contenido de las propiedades fisicoquímicas en los suelos de los 30 puntos muestreados. El contenido de pH presentó una variabilidad desde 3,84 – 5,52 con una desviación estándar (SD) de 0,33. Esto denota muestras que son extremadamente ácidas hasta fuertemente ácidas, esto de acuerdo a la clasificación de la AEFA (s.f.), denotando una calidad desfavorable, la misma que a menudo suele ir acompañado de una escasa ausencia de Ca, K, Mg, N, P, S, Mo; con abundancia de Cu, Fe, Mn, Zn, Co y con una escasa actividad bacteriana en el suelo. Así, se tiene como valor promedio de pH a 4,35 y un coeficiente de variación de 7,64%, lo que denota una baja variabilidad de los valores debido al factor humano interviniente.

La materia orgánica presenta un valor medio de 1,39%, teniendo un intervalo de 1,02 – 2,00 como valores porcentuales; así, presenta uno de los menores valores de C.V. con 17,08%; sin embargo, la clasificación de Benzing (2001), la registra como suelos de nivel “pobre” de concentración. Teniendo en cuenta la referencia de Gracia (2012), la mineralización de la materia orgánica es conveniente, puesto que al adicionarse materia orgánica se mejora las características fisicoquímicas del suelo, dada la formación de agregados y la estabilidad estructural, situación que beneficia la penetración y retención del agua, y reduce los procesos erosionales; el aumento de materia orgánica incrementa la capacidad de cambio del suelo y con esto las reservas nutricionales para los vegetales. Los bajos niveles de este elemento denotan la baja calidad del suelo.

Tabla 11. Estadísticos descriptivos de las propiedades fisicoquímicas

Parámetro	N	Media	Mínimo	Máximo	Varianza	Desviación estándar	Coficiente de variación
pH	30	4,35	3,84	5,52	0,11	0,33	7,64%
Materia orgánica (%)	30	1,39	1,02	2,00	0,06	0,24	17,08%
Nitrógeno (%)	30	0,07	0,05	0,10	0,00014	0,01189	17,06%
Fósforo (ppm)	30	3,67	1,99	8,97	2,53	1,59	43,33%
Potasio (ppm)	30	70,17	31,49	112,95	575,68	23,99	34,19%

Para el caso del nitrógeno, la referencia de Benzing (2001) clasifica a los suelos como de concentración “muy baja” debido al promedio de 0,07% y un C.V. de 17,06%, este

último valor denota poca relevancia en referencia al efecto de la actividad humana al medir los valores. Así, de acuerdo con Yakabi (2014), este comportamiento del nitrógeno se encuentra relacionado con el pH a través de la nitrificación, proceso donde se liberan iones H^+ , por esto se infiere que la acidificación incrementa con la degradación de la materia orgánica y una fuente de nitrógeno amoniacal. Estos registros del nitrógeno en el suelo verifican la baja capacidad agrícola, así como de regeneración natural, esto coincidiendo con Rodríguez (1991) quien menciona que el nitrógeno influye en el desarrollo y progreso de las plantas, está determinando por el balance del crecimiento vegetativo y reproductivo a través de la relación C/N.

El fósforo tiene como valor promedio de 6,67 ppm y un coeficiente de variación de 43.3%, lo que denota una alta variabilidad de los valores dado los errores humanos intervinientes. De acuerdo a Benzing (2001) se clasifican como suelos de “bajo nivel”; el análisis de los resultados de P y N en el suelo se basa en la mención de Jiménez *et al.* (2010), quienes detallan que la alta fijación del P en medios ácidos provoca un bajo nivel de formación de amonio y nitratos coincidiendo en los bajos niveles de N, coincidiendo con los resultados obtenidos. Los bajos niveles podrían deberse a que se encuentran no disponibles, esto considerando que el fosforo integra las estructuras rocosas y los minerales presentes en el suelo, por esto, coincidiendo con Gomero y Velásquez (1999), el fósforo puede estar “fijado” (no disponible).

Para el nivel de potasio disponible en las muestras, se registró un valor medio de 70,17 ppm teniendo un intervalo de 31,49 – 112,95 ppm; así, presenta uno de los mayores valores de C.V. con 34,19%; lo que evidencia un mal manejo de los datos recogidos en campo dado los errores humanos. El valor promedio registrado, de acuerdo a la clasificación de Benzing (2001) es de “baja” concentración; a esto es importante que dado el comportamiento de las variables anteriormente no es coincidente estos niveles en los suelos en estudio.

En ese sentido, dado los bajos niveles de los principales elementos nutricionales en el suelo en estudio es recomendable la aplicación de una tecnología de recuperación que considere la aplicación de enmiendas orgánicas, a su vez, se hace necesario conocer la estructura espacial de estos elementos, para el desarrollo de una metodología ideal de recuperación que considere la zonificación de los niveles de cada uno.

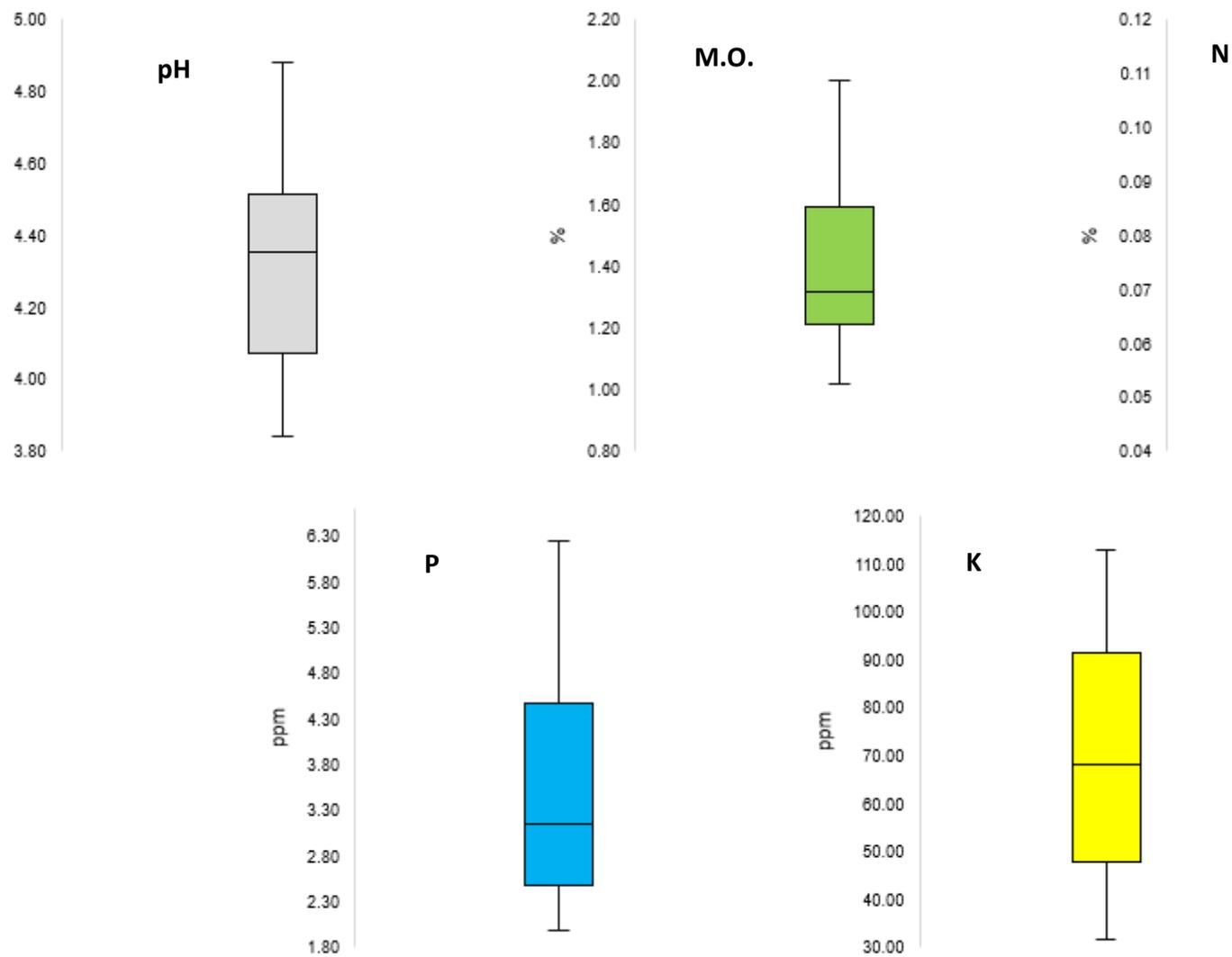


Figura 4. Valores de los parámetros: pH, materia orgánica (M.O.), nitrógeno (N), fósforo (P) y potasio (K) de los suelos en estudio

4.1.2. Prueba de Kolmogorov-Smirnov

La prueba de Kolmogorov-Smirnov (K – S) ($P > 0.05$) revelaron que la hipótesis nula de la normalidad se rechazó para M.O., N y P en las muestras de interpolación, asimismo, las muestras de comparación se rechazaron las pruebas para pH, P y K (Tabla 12). En ese sentido, será necesario la transformación de valores para el siguiente análisis geoestadístico recomendado por Webster y Oliver (2007) y Cao *et al.*, (2017) cumpliendo con los supuestos que sugieren.

Tabla 12. Prueba de normalidad de los parámetros físico y químico de los suelos en estudio de acuerdo al tipo de muestra

Parámetro	Interpolación				Comparación			
	N	Media	Estadístico	Sig.	N	Media	Estadístico	Sig.
pH (1:1)	15	4,197	0,937	0,343	15	4,499	0,864	0,028
Materia orgánica (%)	15	1,248	0,870	0,034	15	1,501	0,954	0,582
Nitrógeno (%)	15	0,064	0,721	0,000	15	0,075	0,917	0,175
Fósforo (ppm)	15	4,752	0,874	0,039	15	2,593	0,777	0,002
Potasio (ppm)	15	74,383	0,934	0,314	15	65,954	0,930	0,276

AS: Altamente significativo al 95% de confiabilidad de acuerdo a la prueba de Kolmogorov-Smirnov

S: Significativo al 95% de confiabilidad de acuerdo a la prueba de Kolmogorov-Smirnov

NS: No significativo al 95% de confiabilidad de acuerdo a la prueba de Kolmogorov-Smirnov

4.1.3. Mapa de Voronoi

De acuerdo con Castejón (2011) el diagrama de Voronoi (DV) se basa en un concepto muy simple, el de la división del espacio en regiones de pertenencia a diferentes localizaciones, según una función de distancia. En la figura 5 se puede apreciar que los polígonos no varían mucho en el tamaño, lo que quiere decir que el muestreo realizado fue homogéneo (Uribe, 2020) a una distancia de 50 metros donde se tomó la muestra.

En el mapa de Voronoi se observa que, para los valores de pH, M.O, N, P y K se encuentra bien distribuido en toda la parcela. Los valores bajos del pH se ven que se encuentran en la periferia de la parcela, los valores medios se encuentran a lo largo de la zona centro y los valores máximos se encuentran sola en una zona del Suroeste de la parcela, para los valores bajos del M.O se encuentran a lo largo del centro de la parcela y los valores medios y altos

están distribuidos en toda la parcela, para el N los valores bajos y medios se ve que están distribuidos en toda la parcela y para los valores altos se ve en áreas diferentes, para P y K los valores bajos, medios y altos se distribuyen en toda la parcela.

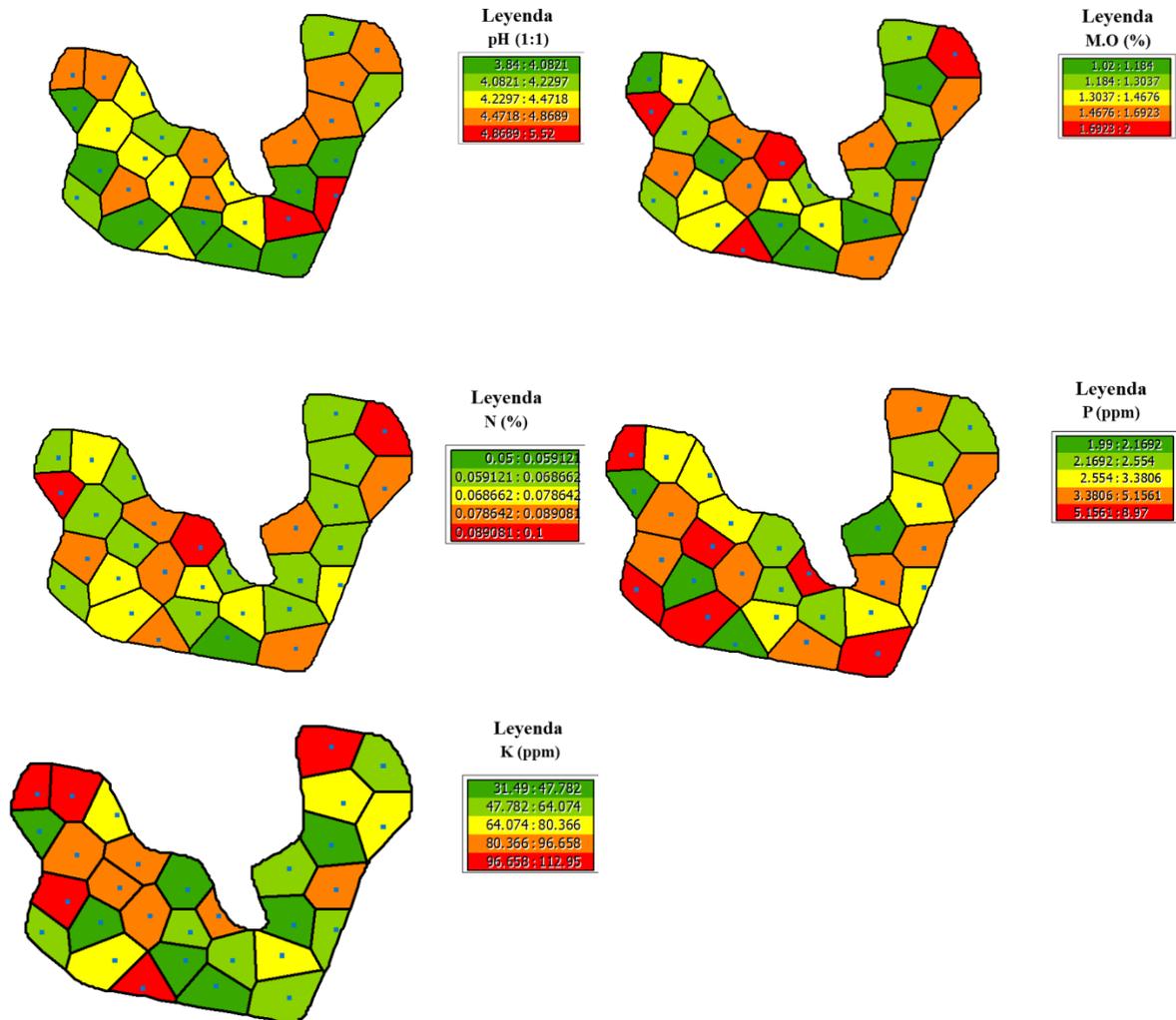


Figura 5. Mapa de Voronoi para las propiedades químicas del suelo

4.1.4. Tendencia

Para pH en el plano XZ tiene una tendencia lineal donde los datos tienden un poco a crecer de este a oeste y para el plano ZY tiene una tendencia cubica donde los datos tienden a crecer un poco de norte a sur y luego decrece de sur a norte, para materia orgánica en el plano XZ tiene una tendencia cuadrática donde los datos tienden a crecer un poco de este a oeste y para el plano ZY tiene una tendencia cuadrática donde los datos tienden a disminuir de norte a sur, para nitrógeno en el plano XZ tiene una tendencia cuadrática donde los datos tienden un poco a disminuir de este a oeste y luego a aumentar de oeste a este y para el plano ZY tiene una tendencia lineal donde los datos tienden a disminuir de norte a sur, para fósforo en el plano XZ

tiene una tendencia lineal donde los datos tienden a disminuir de este a oeste y para el plano ZY tiene una tendencia cuadrática donde los datos tienden a crecer de norte a sur y para potasio en el plano XZ tiene una tendencia cuadrática donde los datos tienden a disminuir de este a oeste y para el plano ZY tiene una tendencia cuadrática donde los datos tienden a crecer de norte a sur.

Tabla 13. Tendencia espacial de los datos

Propiedades químicas	Tendencia	
	XZ	ZY
pH	Lineal	Cubica
Materia orgánica (%)	Cuadrática	Cuadrática
Nitrógeno (%)	Cuadrática	Lineal
Fósforo (ppm)	Lineal	Cuadrática
Potasio (ppm)	Cuadrática	Cuadrática

4.1.5. Semivarianza

En la figura 6 se muestra la semivarianza de los datos, donde se genera más puntos que las muestras, estos puntos nos muestra la relación que hay entre cada uno de los puntos de las muestras. De acuerdo con a la primera geográfica de Tobler (1970) menciona que todo está relacionado con todo lo demás, pero las cosas cercanas están más relacionadas que las distantes, entre más alto es la semivarianza pues la relación será diferente debido a la distancia en que se encuentren.

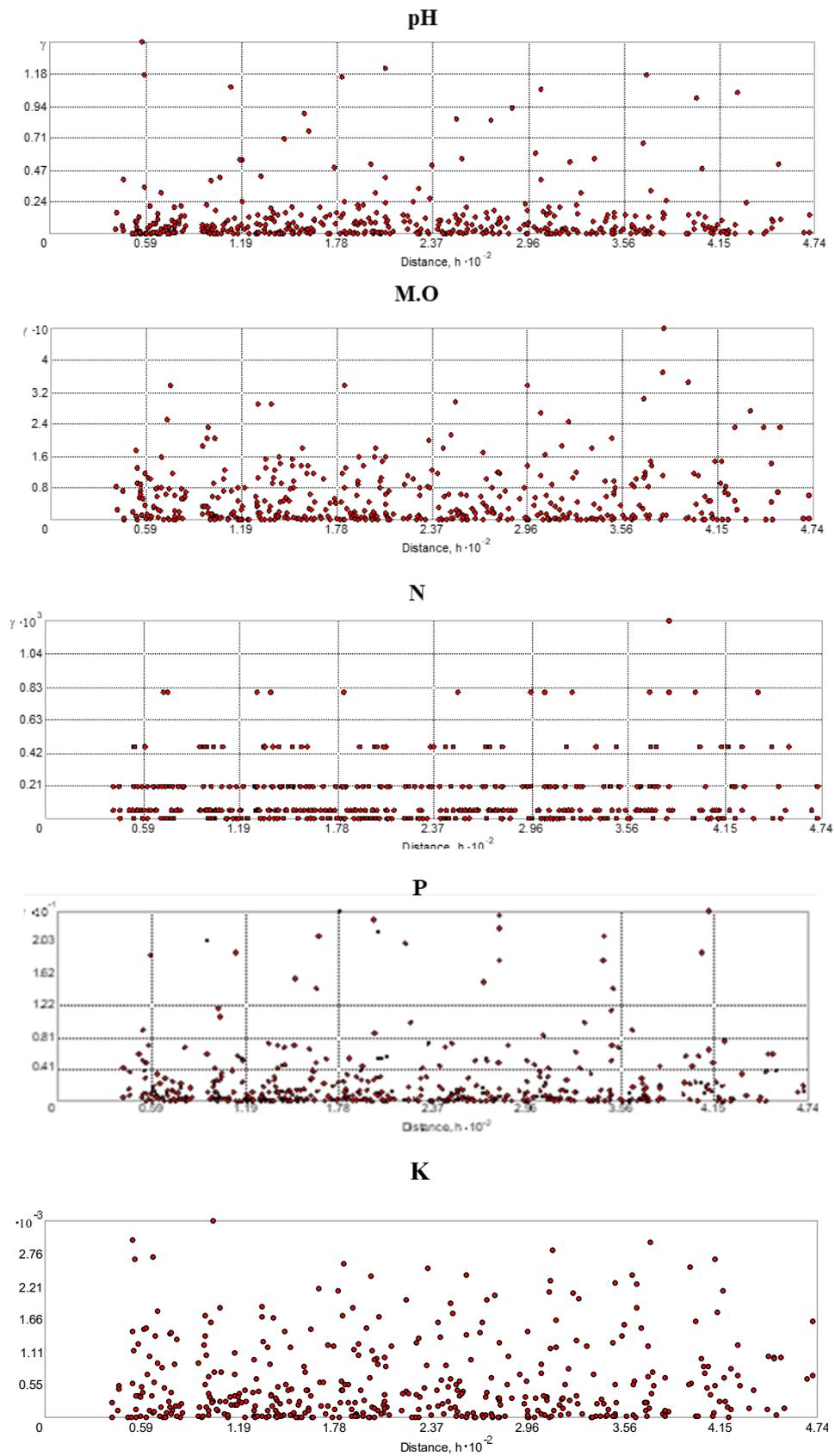


Figura 6. Semivarianza de las propiedades químicas.

4.2. Estimar los modelos de las propiedades químicas mediante la interpolación KO y IDW.

En la presente investigación, se emplearon los métodos geoestadísticos para detallar la distribución espacial y analizar los patrones espaciales y la variación de los parámetros fisicoquímicos en los suelos. Se construyeron las ecuaciones de regresión empleando componentes de regresiones lineales. Para la prueba de K – S el valor determinado que los residuos de la regresión de los parámetros fisicoquímicos para totalidad de las muestras de limo y arcilla se distribuyeron de forma normal ($P > 0.05$), donde se puede apreciar en la Tabla 11. Con los valores de la suma residual y sus residuales generales fueron escogidos los modelos de semivarianza de los parámetros fisicoquímicos, se escogieron usando las herramientas de análisis geoestadísticos de ArcGis (versión 10.5) y los modelos y parámetros de semivariogramas mejor ajustados se detalla en la Tabla 9.

4.2.1. Parámetros del modelo de KO

Este análisis nos reveló al modelo de variograma que mejor se ajuste en la transformación normal de los parámetros fisicoquímicos, los modelos fueron: para pH circular, M.O. gaussiano, N circular, P gaussiano y K exponencial.

Tabla 14. Parámetros del semivariograma de Kriging Ordinario.

Parámetro	K - S	Modelo	Alcance (m)	Efecto Pipeta (C0)	Umbral	C0/Umbral
pH	0.5	Circular	541.4	0.02189	0.06845	0.3198
M.O	0.61	Gaussiano	247.2	0.00904	0.02128	0.4248
N	0.54	Circular	309.9	0.00003	0.00011	0.0263
P	0.58	Gaussiano	557.2	1.282213	1.493221	0.8587
K	0.57	Exponencial	552.05	41.34471	801.0451	0.0516

Los rangos variaron de 247 hasta 557 m, para M.O y P, respectivamente; superando la distancia mínima muestreada usado en la presente investigación, lo cual fue de 50 m indicando una apropiada distancia de muestreo (Van Groenigen *et al.*, 2000). Se aprecia que existe dependencia espacial o estructural a 552 m, 541 m y 557 m de un punto a otro al medir el pH, K y P, por lo tanto, sugiere un efecto de autocorrelación fuerte debido a algún factor de mayor influencia (Villalobos *et al.*, 2008). La mayoría de los parámetros fisicoquímicos las relaciones C0/Umbral tuvieron valores de 0.05 a 0.67 y más reducida que el parámetro fósforo

(0.85), lo que expresa una moderada correlación espacial. Sin embargo, las proporciones C0/Umbrales para la revitalización, en el fósforo presentó un valor mayor a 0.75, habiendo una dependencia espacial débil. Para todos los casos fue posible hallar el valor crítico del rango, con el que logra el punto de mayor valor en la covarianza o sill, carácter necesario para obtener un adecuado semivariograma (Demmers, 1999).

4.2.2. Distribución espacial de las propiedades químicas

Se generaron mapas por el método de interpolación KO y IDW de distribución espacial del contenido de los parámetros fisicoquímicos en los suelos. Los valores usados para el pronóstico por KO de los parámetros fisicoquímicos se usó con diversos modelos de semivariogramas (circular, exponencial, esférico y gaussiano), de acuerdo con el análisis de R^2 que mayor valor presenta y el menor error, se obtuvo: para pH modelo circular, M.O circular, N modelo circular, P modelo gaussiano y K modelo exponencial. El método IDW se hace cargo que las predicciones sean una combinación lineal de los valores, tienden a generar patrones irrealizables, distinguiéndose como tipo “ojo de buey”, aladaños a los puntos muestreados y la precisión al estimar es predominado por la varianza aleatoria, la estructura de variación y la intensidad de muestreo (Fortis *et al.*, 2010). Cabe detallar que los mapas interpolados se muestran a detalle en el Anexo 5.

4.2.2.1. Distribución espacial del pH

De acuerdo con los rangos de predicción, los valores pronosticados para el pH con KO (4.1 – 4.64, Figura 7) y de IDW (3.99 - 4.88, Figura 7), ambos métodos presentaron un rango reducido con el mínimo valor de la muestra y el máximo valor de la muestra (3,84 – 5,52), esto se debe al efecto suavizante (Odeh *et al.*, 1994). En cambio, los valores de los rangos de contenidos de la interpolación con IDW para el pH oscilaron más cerca al rango de muestreo.

Asimismo, en la Figura 7 se puede apreciar los mapas, de acuerdo a la reclasificación para los valores del pH mediante rangos coloridos visualizado en los mapas; con la interpolación KO y IDW el área de investigación presenta suelos que van desde extremadamente ácido a fuertemente ácido.

Como se puede apreciar en la Figura 7, el IDW es más propenso a crear puntos de concentración (más conocido como “ojos de buey”) en el extremo Noreste, mientras que para el KO genera un mapa con cambios menos repentinos en el área de transición. Las áreas

estimadas para valores de pH visualmente más bajas tienden a ser parecidos entre ambas interpolaciones, sin embargo, el IDW presenta mayor tendencia a formar islas.

4.2.2.2. Distribución espacial de la materia orgánica (M.O.)

Para los rangos de predicción de la materia orgánica con KO (1.04-1.73 %, Fig. 6) y IDW (1.02 – 1.78 %, Fig. 8), la interpolación KO presento tener rango reducido para el valor mínimo de la muestra (1.02 %) a comparación con la interpolación IDW que no presento un rango reducido, para el valor máximo (2 %) de la muestra ambos métodos presentan un rango estrecho, este se debe al efecto suavizante (Odeha *et al.*, 1994). A diferencia, los rangos de contenido de IDW oscilaron más cerca al rango de muestreo. Asimismo, en la Figura 8 se puede observar los mapas reclasificados con los valores de M.O. mediante rangos coloridos visualizado en los mapas; con la interpolación KO e IDW el área de investigación presenta suelos pobres y medianamente pobres.

En la figura 8, las estimaciones de materia orgánica con Kriging son más propenso a tener el mismo efecto cuando el IDW es empleado. El Kriging vuelve a generar un mapa con cambios menos repentinos en las áreas de transición que las del IDW. No obstante, las áreas de mayor y menor concentración de M.O. son muy parecidos.

4.2.2.3. Distribución espacial del nitrógeno (N)

En la Figura 9 se puede apreciar los valores de predicción del nitrógeno, para el KO (0.06 – 0.07 %) y con IDW (0.06 – 0.09 %), ambos métodos presentaron un rango reducido con el mínimo valor de la muestra y al máximo valor de la muestra (0.05 – 0.1 %), esto se debe al efecto de suavizante (Odeha *et al.*, 1994). En cambio, los valores de los rangos de contenidos de la interpolación con IDW para el N oscilaron más cerca al rango de muestreo.

Asimismo, en la Figura 9 se puede apreciar los mapas, de acuerdo a la reclasificación para los valores del Nitrógeno (N) mediante rangos coloridos que se visibiliza en los mapas; con la interpolación KO y IDW el área de investigación presenta un nivel bajo de nitrógeno en el suelo.

Como se observa en la Figura 9, el IDW es más propenso a formar islas en los extremos Oeste y Este, a diferencia del KO genera un mapa con cambios menos repentinos en las áreas de transición. Las áreas estimadas de mayor y menor concentración para el Nitrógeno son diferentes.

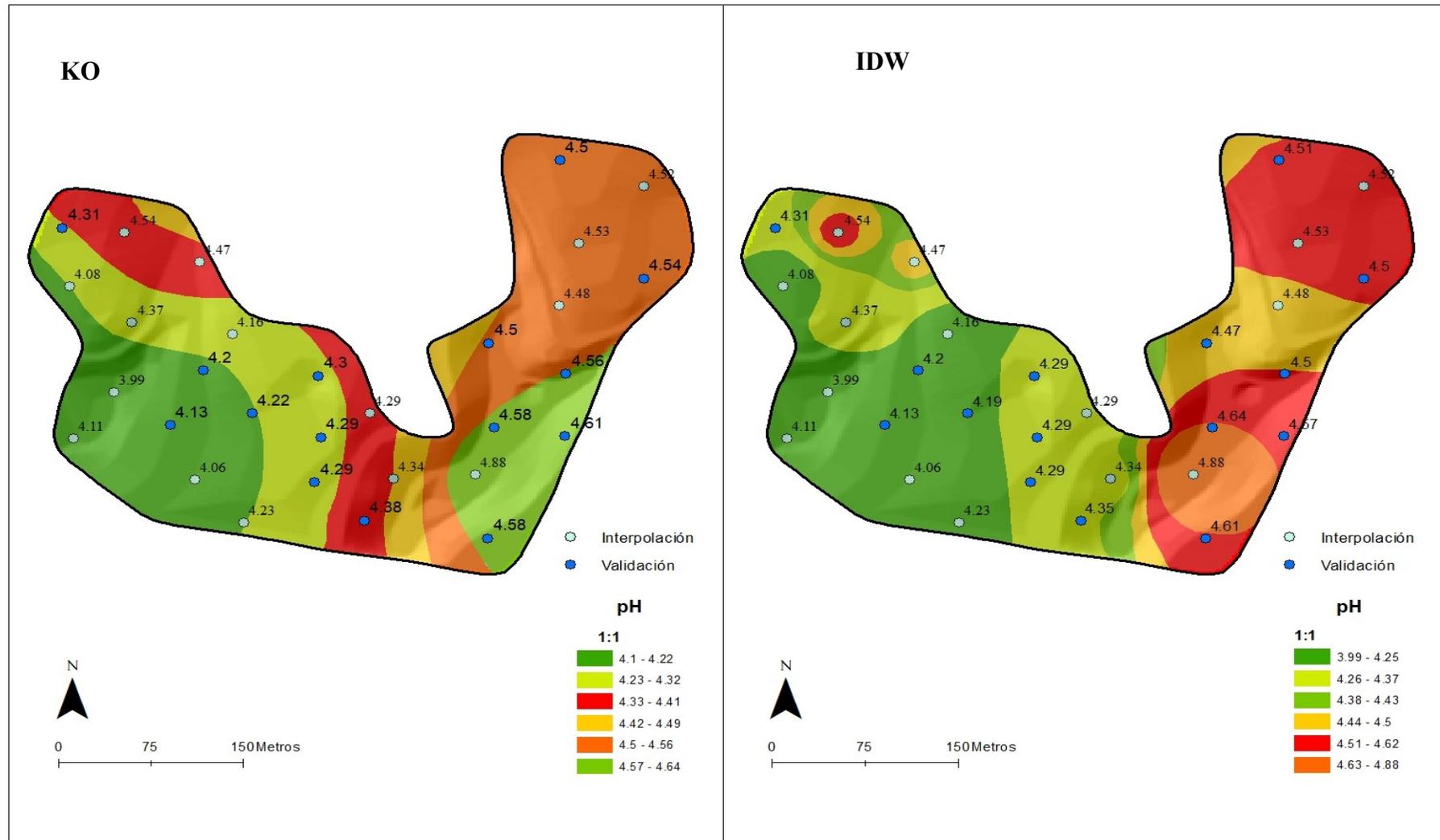


Figura 7. Mapa de pH del suelo por la interpolación KO e IDW.

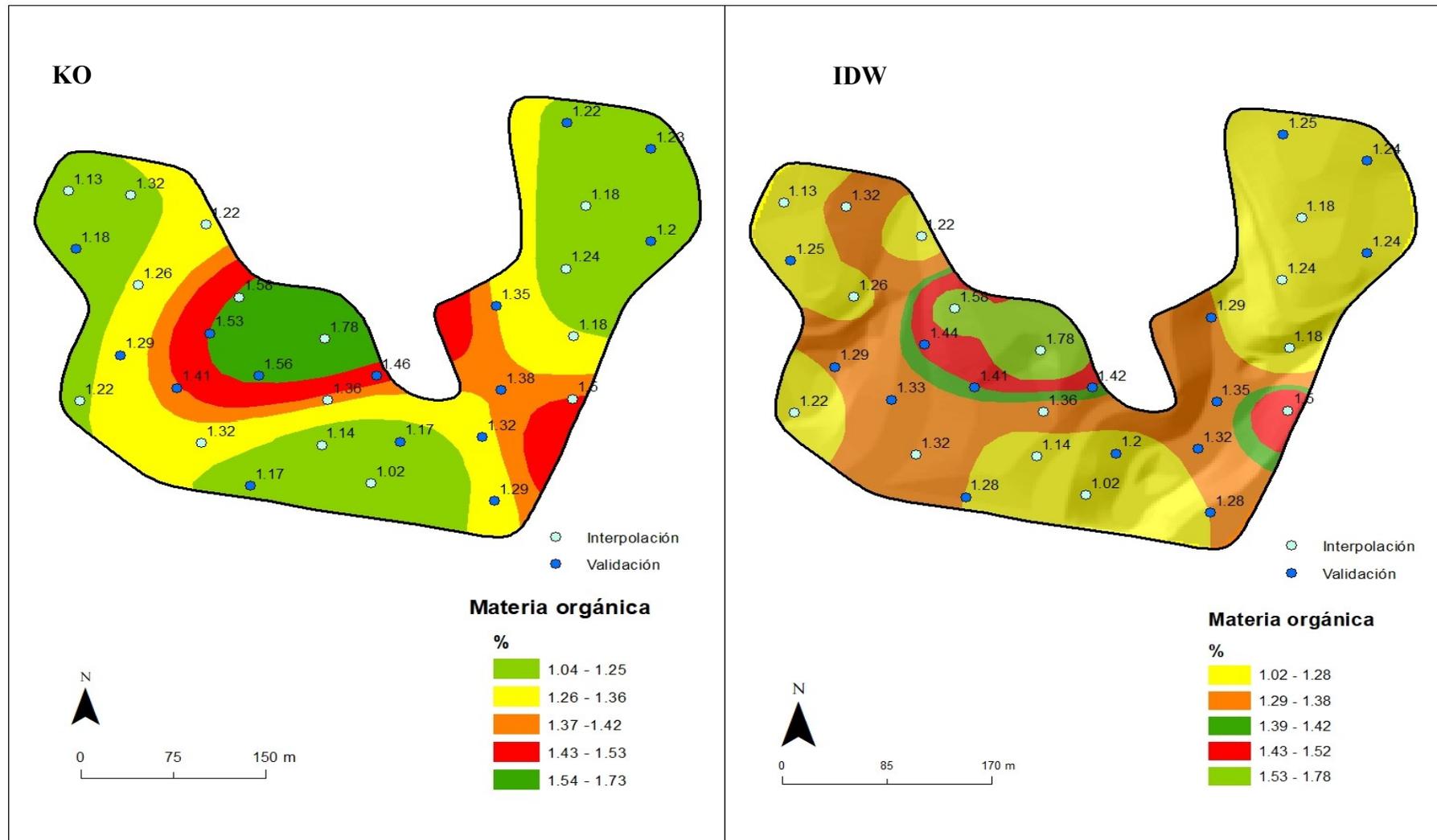


Figura 8. Mapa de MO del suelo por la interpolación KO e IDW

4.2.2.4. Distribución espacial del fósforo (P)

Para los rangos de predicción del fosforo con KO (2.59 – 5.01 ppm, Fig. 10) y IDW (2 – 2.58 ppm, Fig. 10), el método KO presento un rango reducido con el mínimo valor de la muestra (1.99 ppm) a comparación con el método de IDW que no muestra un rango estrecho, para el valor máximo (8.97 ppm) de la muestra ambos métodos presentan un rango estrecho, esto se debe al efecto suavizante (Odeha *et al.*, 1994). En cambio, los valores de los rangos de contenidos de la interpolación con IDW para el P oscilaron más cerca al rango de muestreo.

Asimismo, en la Figura 10 se puede apreciar los mapas, de acuerdo a la reclasificación para los valores del Fosforo (P) mediante rangos coloridos que se visibiliza en los mapas; con la interpolación KO y IDW el área de investigación presenta un nivel muy bajo y bajo de fósforo en el suelo.

En la Figura 10, el IDW es más propenso a formar islas en el centro, a diferencia del KO genera un mapa con cambios menos repentinos en las áreas de transición. Las áreas estimadas de mayor y menor concentración para el Fósforo son diferentes.

4.2.2.5. Distribución espacial del potasio (K)

Para el contenido de potasio en el suelo, los rangos de predicción por KO fue de 41 – 107 ppm y para IDW fue 37.7 – 109 ppm, ambos métodos presentaron un rango reducido con el mínimo valor de la muestra y el máximo valor de la muestra que es 31.49 – 112.95 ppm, esto se debe al efecto suavizante (Odeha *et al.*, 1994). En cambio, los valores de los rangos de contenidos de la interpolación con IDW para el K oscilaron más cerca al rango de muestreo.

Asimismo, en la Figura 11 se puede apreciar los mapas, de acuerdo a la reclasificación para los valores del Potasio (K) mediante rangos coloridos que se visibiliza en los mapas; con la interpolación KO y IDW el área de investigación presenta un nivel muy bajo y bajo de potasio en el suelo.

En la Figura 11, el IDW es más propenso a formar islas del Oeste hacia el centro y al Este, a diferencia del KO genera un mapa con cambios menos repentinos en las áreas de transición. Las áreas estimadas de mayor y menor concentración para el Potasio son similares.

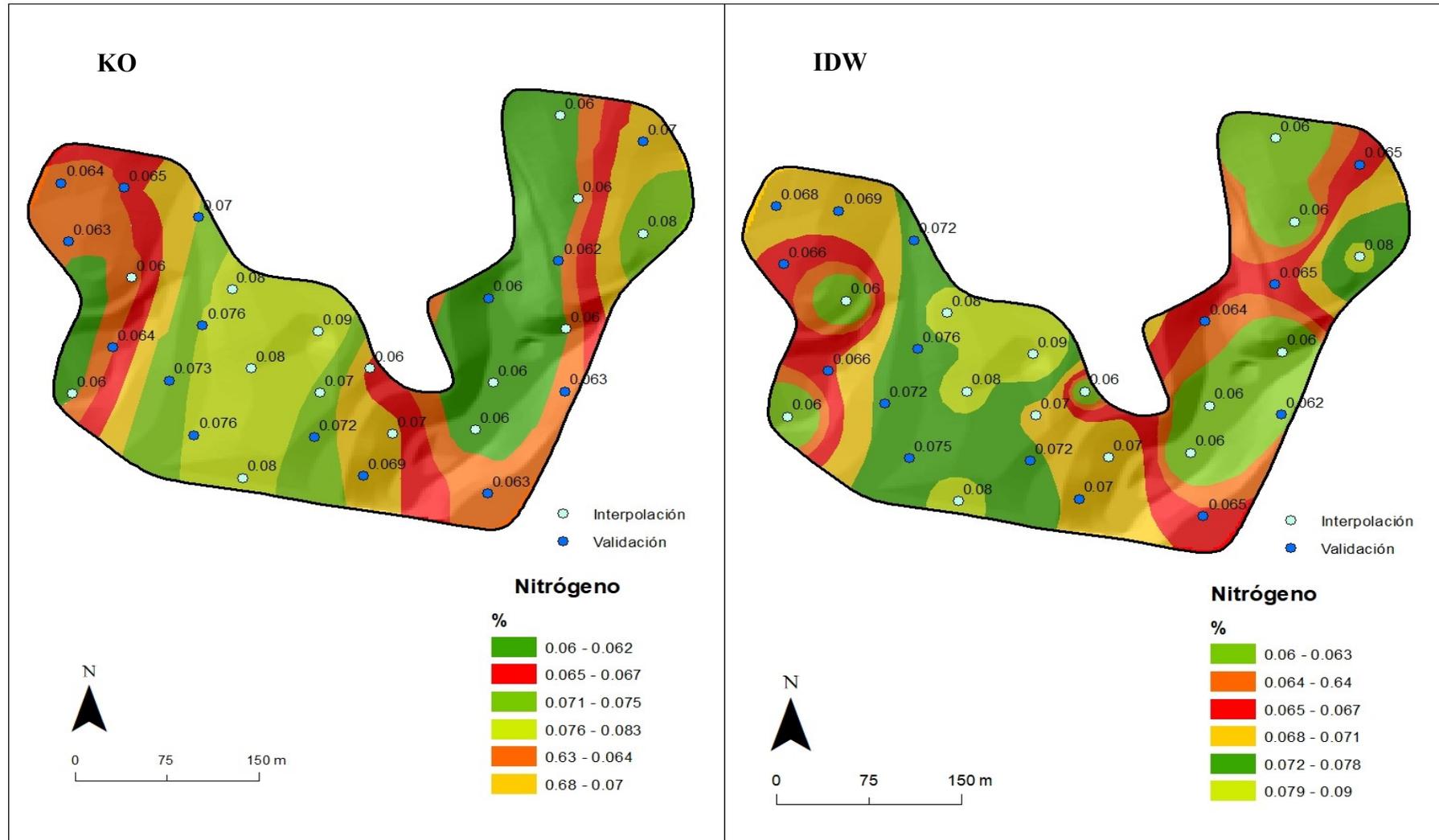


Figura 9. Mapa de N del suelo por la interpolación KO e IDW.

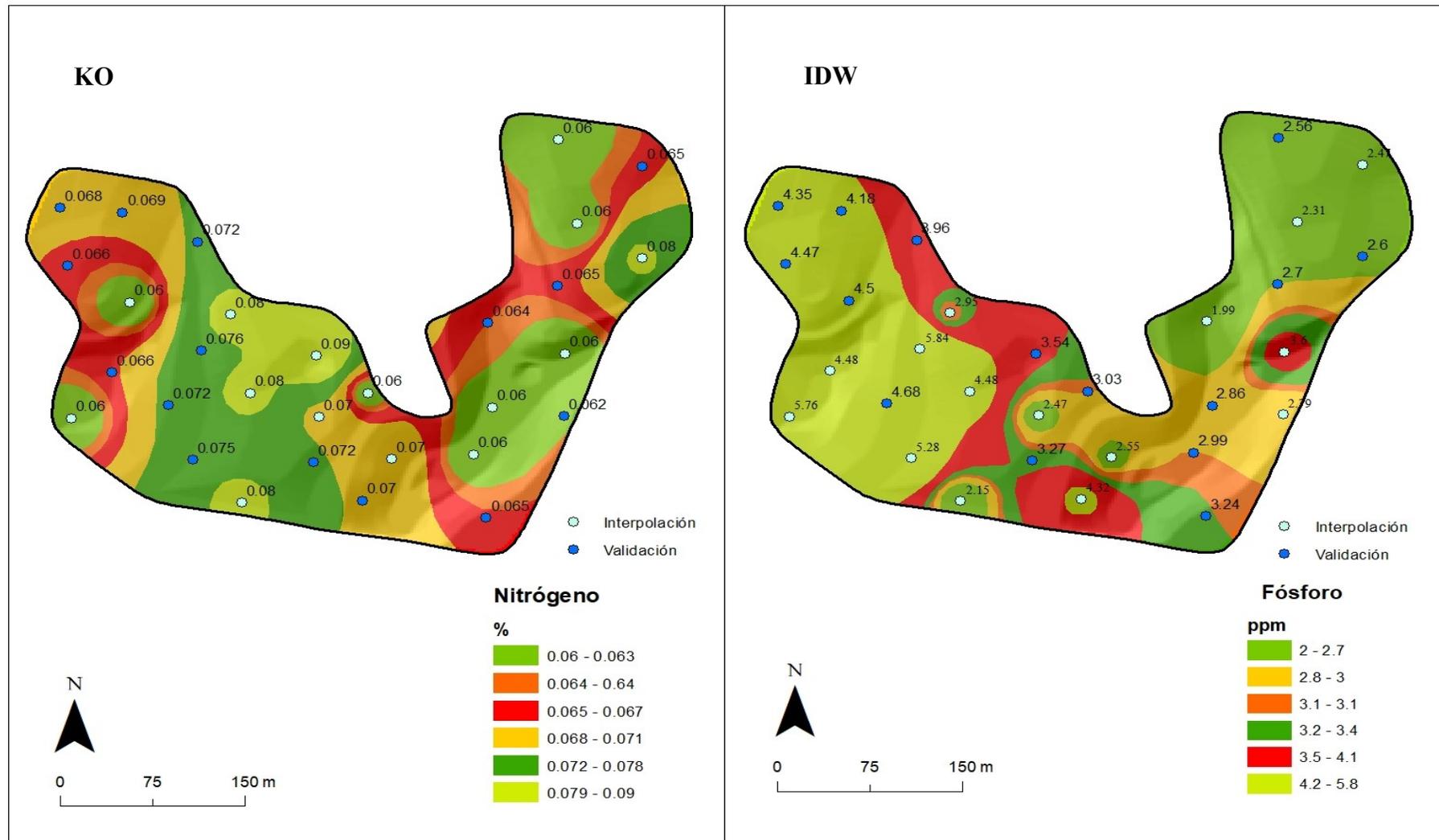


Figura 10. Mapa de P del suelo por la interpolación KO e IDW

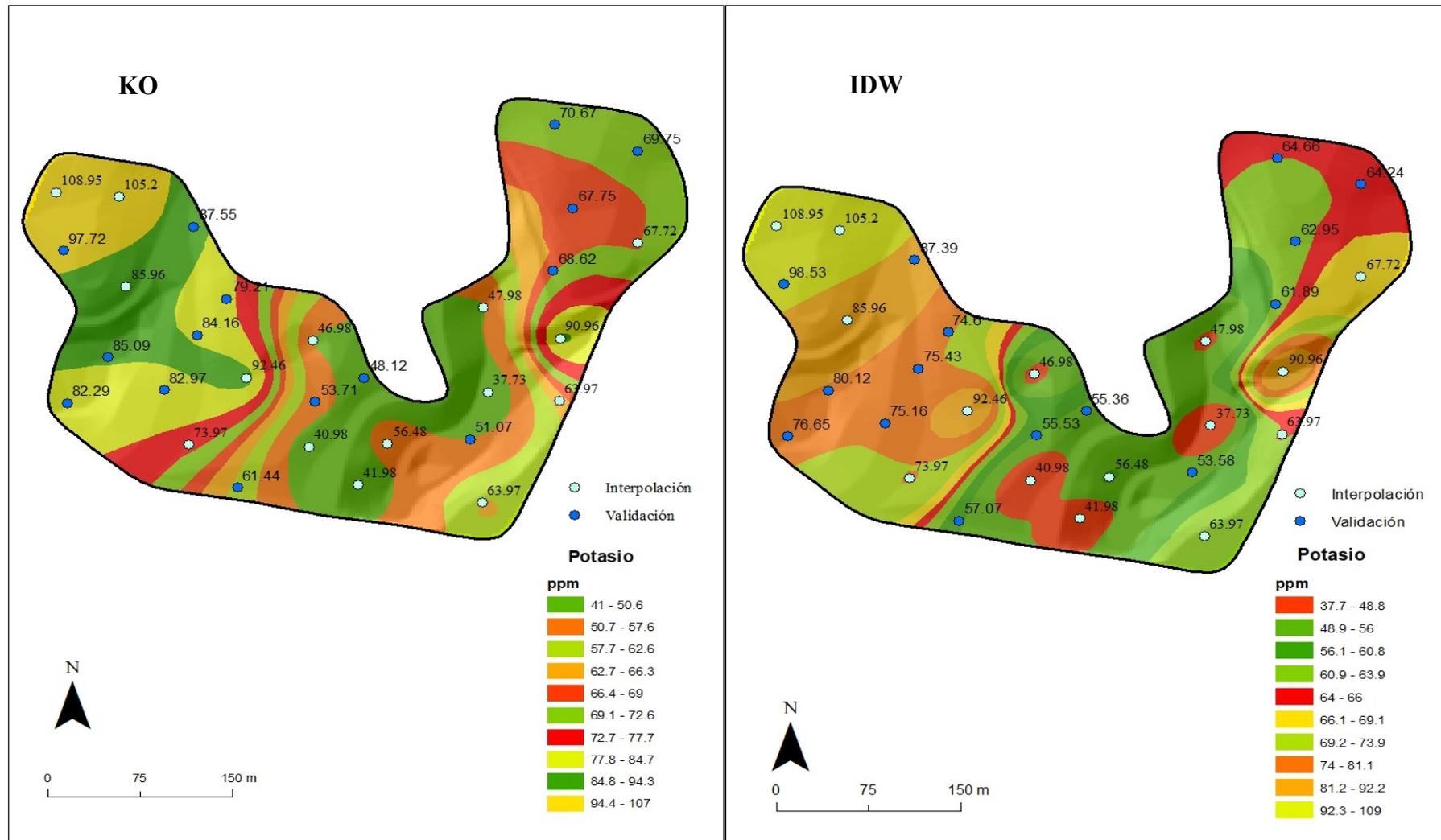


Figura 11. Mapa de potasio (K) del suelo por la interpolación KO e IDW.

Se realizó la correlación de Pearson con los datos de la interpolación y comparación para analizar el grado de correlación de cada parámetro estudiado. Se puede apreciar algo parecido con los datos de interpolación y comparación.

Tabla 15. Correlación de Pearson entre los parámetros físicos y químicos.

KO y IDW	N=30					
	pH	M.O	N	P	K	
Interpolación	pH	1.000	0.004	0.049	-0.266	-0.301
	M.O		1.000	0.374	-0.465	0.310
	N			1.000	-0.495	0.036
	P				1.000	0.347
	K					1.000
Comparación	pH	1.000	0.036	-0.127	-0.330	-0.226
	M.O		1.000	0.279	-0.228	-0.002
	N			1.000	-0.136	0.135
	P				1.000	0.224
	K					1.000

4.3. Validar los modelos de distribución espacial de las propiedades químicas

La tabla 11 resume los resultados de la interpolación usando el método Kriging e IDW. Para la predicción de los parámetros por el método Kriging se efectuó con el modelo circular, esférico, exponencial y gaussiano, para seleccionar el modelo más adecuado, en base a la validación de EM, EAM, RMSE y el R^2 se decidió elegir el modelo que mejor se ajustaba a la realidad, logrando como resultado para el pH el modelo circular, para la materia orgánica (M.O) el modelo gaussiano, para el nitrógeno (N) el modelo circular, para el fosforo (P) el modelo gaussiano y para el potasio (K) el modelo exponencial, la cual presentaron un error medio de -0.0053, 0.00898, 0.000001, 0.0151 y -0.4223, respectivamente. Por el método IDW se obtuvo un error medio de -0.0132, 0.0062, 0.0008, 0.0872 y -0.7870 para pH, M.O, N, P y K, respectivamente. Villatoro *et al.* (2008), encontró en su estudio un error medio bajo utilizando KO con respecto a la interpolación IDW.

Los valores de R^2 para KO oscilaron de 0.153 – 3.82, a comparación de IDW que oscilaron de -0.07 – 0.34. Los valores de R^2 fueron bajos en el KO, un factor posible debe deberse a la cantidad de muestras de la investigación y a la distancia en que se obtuvo la muestra. Henríquez *et al.* (2013), tuvo un valor de R^2 mayor de 7, en donde tuvo como 40 muestras a una distancia de 40 m en un área de 8.4 ha.

Tabla 16. Valores de validación para el KO e IDW.

Técnica	Parámetros	N=15						
		Modelo	R ²	EM	EAM	ECM	K-S	Valor de p
Kriging ordinario	pH	Circular	0.286	0.0053	0.14834	0.03835	0.502	0.01
	M.O	Gaussiano	0.218	0.00898	0.14221	0.02779	0.681	0.01
	N	Circular	0.153	0.00001	0.00768	0.00009	0.575	0.01
	P	Gaussiano	0.21	0.01513	1.01105	1.35083	0.58	0.01
	K	Exponencial	0.382	-0.42232	15.08685	324.51939	0.57	0.01
IDW	pH	-	0.191	-0.01325	0.15654	0.04345	0.595	0.01
	M.O	-	-0.036	0.00621	0.15348	0.0368	0.56	0.01
	N	-	-0.076	0.00081	0.00917	0.00011	0.431	0.01
	P	-	-0.053	0.08722	1.16968	1.80032	0.529	0.01
	K	-	0.34	-0.787	14.5256	346.2553	0.843	0.01

El método KO mejora la precisión en la estimación de los parámetros químicos del suelo en términos de EM, EAM y ECM, pero no en términos de coeficiente de determinación (R²), lo mismo reporto de Gordon *et al.*(2014).

De acuerdo con el análisis de predicción (E), se encontraron que los valores de interpolación KO difirieron a los obtenidos por la interpolación IDW. En este aspecto, los coeficientes de correlación para KO fueron mayores, 0.25 para pH, 0.55 para N, 0.45 para P y 0.19 para K, a comparación de la M.O que fue mayor en IDW. Villatoro *et al.*, (2008) encontró que el método Kriging arrojó resultados mejores, de acuerdo al análisis de efectividad de predicción (E), en mayor grado de estimación para variables como el pH, Ca y CICE y en menor grado para el P, a diferencia del IDW. El coeficiente de correlación (r) entre los parámetros químicos medidos y estimados por interpolación también depende del punto de muestreo, la diferencia en los valores r existe entre los métodos de interpolación depende de los puntos de muestreo.

Tabla 17. Valores de eficiencia de predicción (E) y del coeficiente de correlación (r).

Método	Parámetro	Validación de campo	
		E	r
KO	pH	14	0.2532
	M.O	14	0.2905
	N	14	0.5531
	P	14	0.4500
	K	15	0.9924
IDW	pH	12	0.2054
	M.O	13	0.3265
	N	13	0.5169
	P	13	0.3935
	K	14	0.1836

La comparación de los resultados de Kriging con los resultados del IDW, proporciona una predicción más baja del error medio en el Kriging. El método Kriging es más preciso (valores mínimos de EM, EAM y ECM), para las interpolaciones de pH, M.O, N, P y K, reportando lo mismo por Villatoro *et al.* (2008), Maglione *et al.* (2019) y Setianto y Triandini (2013), a diferencia de Gordon *et al.* (2014) afirma que el IDW es mejor que el KO para estimar las concentraciones de arsenico.

V. CONCLUSIONES

- Se identificaron suelos degradados con bajos niveles nutricionales, desde ácidos fuertemente ácidos a extremadamente ácidos ($3,84 < \text{pH} < 5,52$) con un valor medio de 4,35. De la misma manera, los valores de materia orgánica ($1,02 < \text{MO}\% < 2,00$), nitrógeno ($0,05 < \text{N}\% < 0,10$), fósforo ($1,99 < \text{P ppm} < 8,97$) y potasio ($31,49 < \text{Kppm} < 112,95$), fueron clasificados como de “bajo nivel”; del cual se infiere la baja calidad productiva de los suelos. De acuerdo con el mapa de Voronoi se puede ver que los polígonos generados para cada propiedad física son homogéneos, lo que quiere decir que se tomaron muestras homogéneas. Los datos presentan tendencias lineales, cuadráticas y cúbicas, así mismo se evidencia que para la semivarianza de los datos, aumenta a raíz de la distancia en que se encuentran.
- El modelo de distribución espacial de los parámetros fisicoquímicos, que se ajustaron de mejor manera es el que utilizó el método geoestadístico pH circular, M.O gaussiano, N circular, P gaussiano y K exponencial, durante la comparación de los semivariogramas (circular, esférico, exponencial y gaussiano). También, el rango óptimo de valores del semivariograma fue superior a la muestra promedio, siendo los valores siguientes: para pH circular (541,4 m), M.O. gaussiano (247,2 m), N circular (309,9 m), P gaussiano (557,2 m) y de K exponencial (552.05 m); estos registros permiten garantizar que los mapas de interpolación en cada parámetro fisicoquímico analizada, muestra la distribución espacial más adecuada.
- Se realizó la estimación de error utilizando el error medio (EM), el error absoluto medio (EAM) y el error cuadrático medio (ECM) para conocer la precisión de los mapas de distribución determinados y así validar la confiabilidad de los mapas generados. Siendo el error medio (EM) es el más común en los SIG; por el método KO, para pH circular (0,0053), M.O. gaussiano (0.0089), N circular (0.00001), P gaussiano (0.0151) y K exponencial (-0.422); mientras que, utilizando el método IDW se tiene para el pH un valor de -0.013; para M.O., 0,0062; para N un valor de 0,0008; P con 0.087; finalmente el K registra un valor de -787; señala que KO fue el modelo mejor ajustado en este estudio. Estos valores indican que el modelo de KO es el modelo de mejor ajuste con un error de 0.05%.

VI. RECOMENDACIONES

- Los resultados de la investigación refleja la distribución espacial de un área de cultivo de palma, esto sirve como base de análisis para la implementación de investigaciones de mayor especificidad, así como para construir un modelo tecnológico que sea sostenible en la producción de palma con el suelo y otros factores ambientales. La presente investigación ejerce como fuente de información para la formulación de planes de fertilización zonificados.
- Se deben de realizar estos tipos de estudios para conocer el comportamiento de la calidad del suelo en diferentes periodos, para así contribuir a tomar buenas decisiones, antes perturbaciones que se puede ocasionar por distintos cambios naturales, calentamiento global y actividades antropogénicas relacionadas al cultivo de palma.
- Es importante que las entidades gubernamentales prioricen programas y políticas que incentiven el estudio y caracterización del suelo con fines de recuperación.
- Los agricultores, generalmente, no conocen la situación nutricional de sus suelos por lo que no aplican planes de fertilización que contribuyan a una mejor productividad y que a su vez conserve y mantenga la calidad del suelo; esto se podría lograr con la participación del gobierno tanto nacional, regional y local también de las universidades, profesionales afines al tema e instituciones ambientales, por medio de proyectos en obras de conservación de suelos y prácticas agronómicas sostenibles.
- Utilizar los mapas de distribución espacial del pH, M.O, N, P y K del área de producción de palma aceitera e los planes de fertilización.

VII. REFERENCIAS

- Andriotti, J. (2010). Fundamentos de estadística e geoestatística. São Leopoldo: Editora Unisinos.
- Arciniegas, E., Gómez, N. (2018). Variabilidad espacial de algunas propiedades físicas y químicas de los suelos, con diferentes sistemas de manejo. [Tesis de pregrado, Universidad de Los Llanos]. Repositorio UNILLANOS. <https://repositorio.unillanos.edu.co/handle/001/1375>
- Arcones, M., & Wang, Y. (2006). Some new tests for normality based on U-processes. *Statistics & Probability Letters*, 69-82. <https://doi.org/10.1016/j.spl.2005.07.003>
- Arya, L., Paris, J. (1981). A physicoempirical model to predict the soil moisture characteristic from particle-size distribution and bulk density data. *Soil Science Society of America Journal*, 45(6): 1023–1030 p.
- Barrios, R., & Florentino, A. (2009). Variabilidad espacial de las propiedades físicas de los suelos cultivados con palma aceitera en el estado Monagas, Venezuela. *Revista UDO Agrícola*, 9(4), 912-924. <http://www.bioline.org.br/pdf/cg09108>
- Benzing, A. (2001). Agricultura orgánica: Fundamentos para la Región Andina. Neckar – Verlag, Postfach, Alemania. 682 p.
- Blanco, A. (2015). Estudio de la distribución espacial y cartografía digital de algunas propiedades físicas, químicas e hidrodinámicas de suelos de la cuenca del Segura. Tesis doctoral, Universidad de Murcia, Murcia. <https://digitum.um.es/digitum/handle/10201/46968>
- Burrough, P. (1993). Soil variability: a late 20th century view. *Soils and Fertilizers*, 56(5), 529-562.
- Cao, S., Lu, A., Wang, J., & Huo, L. (2017). Modeling and mapping of cadmium in soils based on qualitative and quantitative auxiliary variables in a cadmium contaminated area. *Science of the Total Environment*, 580, 430-439.
- Cepeda, D. (1991). Química de Suelos. 2º ed. Trillas S.A., México. 167 p.
- Christensen, R. (1991). Linear models for multivariate, time series and spatial data. New York: Springer 2º ed. 336 p.

- Corbella, R., Fernández, J. (s.f.). Materia orgánica del suelo. Facultad de Agronomía y Zootecnia, Universidad Nacional de Tucumán. 10 p.
<https://www.edafologia.org/app/download/7953479876/Materia+Organica+del+Suelo.pdf?t=1563476239>
- Déleg, X. (2018). Determinación de la variabilidad espacial de las características físicas del suelo en la parcela experimental Irquis. [Tesis de pregrado, Universidad de Cuenca]. Repositorio UCUENCA. <http://dspace.ucuenca.edu.ec/handle/123456789/30227>
- Demmers, Michael. 1999. Fundamentals of geographic information systems. 2 ed. Wiley. 498 p
- Departamento de Agricultura de los Estados Unidos - USDA (1996). Manual de métodos de laboratorio de levantamiento de suelos. Informe de Investigaciones de Encuesta de Suelos N 42. Versión 3.0. Washington DC, EE. UU., 693 p.
- Emery, X. (2013). Geoestadística. Universidad de Chile, Facultad de ciencias y matemáticas, Santiago de Chile.
- Environmental Systems Research Institute. (s.f.). ArcGIS Desktop. Obtenido de <https://www.esri.com/es-es/arcgis/products/arcgis-desktop/resources>
- Fassbender, H.W. (1975). Química de suelos con énfasis en suelos de América Latina. Instituto Iberoamericano de Ciencias Agrícolas de la OEA. Turrialba, Costa Rica. 398 p.
<https://repositorio.iica.int/handle/11324/6801>
- Ferreira, A. (2005). Analysis of Composite Plates Using a Layerwise Theory and Multiquadrics Discretization. *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, 12(2), 99-112. doi:10.1080/15376490490493952
- Fortis, Manuel; Huerta, Alexis; Segura, Miguel; García, José; Leos, Juan; García, Alberto; Valdez, Ricardo (2010). Validación de cuatro modelos de interpolación para cartografiar nitrato y amonio en suelo. *Terra Latinoamericana*, 28(4),371-379.
- Gomero, L., Velásquez, H. (1999). Manejo Ecológico de Suelos. Edición RAA. Lima- Perú. 230 p.
- Gonzales, S.A. (2015). Distribución espacial por unidades fisiográficas, las propiedades físicas y químicas de los suelos con –palma aceitera (*Elaeis guineensis* Jacq.), Nueva Requena - Ucayali. [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Agraria de la Selva]. Repositorio CONCYTEC.

https://alicia.concytec.gob.pe/vufind/Record/UNAS_118577fc709357f39c2bbf42196db4ab/Description

- Goovaerts, P. (1997). Geostatistics for natural resource evaluation. Oxford University Press, New York. 463 p
- Gracia, J. (2012). Efectos de los compost sobre las propiedades del suelo: suelo evaluación comparativa de compost con separación en origen y sin separación en origen. [Tesis de maestría, Universidad Politécnica de Cartagena]. Repositorio UPCT. <https://repositorio.upct.es/handle/10317/3123>
- Gros, A., Domínguez, A. (1992). Abonos guía práctica de la fertilización. 8va. edición. Ediciones Mundi-Prensa. Madrid. 450 p.
- Henríquez, C., Méndez, J.C., Masís, R. (2013). Interpolación de variables de fertilidad de suelo mediante el Análisis kriging y su validación. Agronomía Costarricense, 37(2): 71-82 p. http://www.scielo.sa.cr/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0377-94242013000200006&lng=en&tlng=es.
<https://journal.ugm.ac.id/jag/article/view/7204/5643>
- Isaaks, E.H., Srivastava, R.M. (1989). An Introduction to Applied Geostatistics. Oxford University Press. New York. 561p.
- Jaramillo, D. (2011). El suelo: origen, propiedades, espacialidad. Medellín: Editorial UN.
- Jaramillo, D. (2012). Variabilidad espacial del suelo: bases para su estudio. Revista de la Facultad de Ciencias, 1(1), 73-87.
- Jiménez, M.; Granados, L.; Oliva, J.; Quiróz, J., Barrón, M. (2010). Calidad nutritiva de *Brachiaria humidicola* con fertilización orgánica e inorgánica en suelos ácidos. Arch. Zootec. 59 (228): 561-570.
- Longley, P., Goodchild, M. Maguire, D. Rhind, D. (2005). Geographical Information Systems: Principles, Techniques, Management and Applications. Spatial Interpolation. Abridged, 2nd ed. 404 p.
- López, C.J. (2016). Distribución espacial de las propiedades químicas de los suelos en el Distrito de Riego RUT. [Tesis de maestría, Universidad Nacional de Colombia]. Repositorio UNAL. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/57874>
- Lozano, Z., Bravo, C. Ovalles, & Hernández, R. (2004). Selección de un diseño de muestreo en parcelas experimentales a partir del estudio de la variabilidad de los suelos. Bioagro,

16(1), 61-72. http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1316-33612004000100009

Maglione, Dora; Soto, Julio; Sáenz, José; Bonfili, Oscar. (2019). Utilización de diferentes metodologías para la construcción de un mapa de precipitación acumulada en la Provincia de Santa Cruz. *Informes Científicos Técnicos - UNPA*. 11. 154-169.

Matheron, G. (1962). *Traité de Géostatistique Appliquée*. Editions Technip, Paris.

Matheron, G. (1971). The theory of regionalized variables and its applications. *Cahiers du Centre de Morphologie MATHématique*, 5, Fontainebleau, Paris.

Mengel, K., Kirkby, E.A. (1987). Potassium. In "Principles of Plant Nutrition". Chapter 10:427-453. I.P.I. Bern, Switzerland

Minitab (s.f.). Prueba de normalidad. <https://support.minitab.com/es-mx/minitab/18/help-and-how-to/statistics/basic-statistics/supporting-topics/normality/test-for-normality/>

Mueller, T.G., Pierce, F.J., Schabenberger, O., Warnede, D.D. (2001). Map quality for site-specific fertility management. *Soil Science Society of American Journal* 65:1547-1558 p.

Mulla, D. Mcbratney, A. McBratney. (2002). *Soil Spatial Variability*. A.Warrick. (editor). *Soil Physics Companion*. Ed. CRC Press. Boca Raton, US. 343-373 p.

Narro, E. (1994). *Física de suelos con enfoque agrícola* (1st ed.). Estado de México: Trillas

Nemes, A., Rawls, W. (2004). Soil texture and particle-size distribution as input to estimate soil hydraulic properties. *Developments in Soil Science*, 30: 47–70 p. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0166248104300048>

Odeha, I.O.A., McBratney, A.B., Chittleborough, D.J., (1994). Spatial prediction of soil properties from landform attributes derived from a digital elevation model. *Geoderma* 63, 197–214.

Pedrosa, I., Juarros-Basterretxea, J., Robles-Fernández, A., Basteiro, J., García-Cueto, E. (2015). Pruebas de bondad de ajuste en distribuciones simétricas, ¿qué estadístico utilizar? *Universitas Psychologica*, 14(1): 245-254 p. <http://dx.doi.org/10.11144/Javeriana.upsy13-5.pbad>

Rawls, W. J. (1983). Estimating soil bulk density from particle size analysis and organic matter content. *Journal Soil Science*, 135 (2): 123–125 p.

https://journals.lww.com/soilsci/Citation/1983/02000/ESTIMATING_SOIL_BULK_DENSITY_FROM_PARTICLE_SIZE.7.aspx

- Regalado, C., Ritter, A. (2005). Técnicas geoestadísticas para caracterizar la variabilidad espacial de la hidrofobicidad en la zona no saturada de una cuenca forestal. *Estudios de La Zona No Saturada Del Suelo*, 7, 235–240 p.
- Rivera, E., Sánchez, M., & Domínguez, H. (2018). pH como factor de crecimiento en las plantas. *Revista UTP*, 4, 101-105.
<https://revistas.utp.ac.pa/index.php/ric/article/view/1829/2639>
- Rodríguez, M. (1991). *Fisiología Vegetal*. Editorial Los Amigos del Libro. Cochabamba – La Paz. 187 - 191 ,343 p.
- Rojo, J. M. (2007). *Regresión lineal múltiple*. Instituto de Economía y Geografía, Laboratorio de Estadística.
http://humanidades.cchs.csic.es/cchs/web_UAE/tutoriales/PDF/Regresion_lineal_multiple_3.pdf
- Romero, M. (2016). Metodología de la investigación, Pruebas de bondad de ajuste a una distribución normal. *Revista Enfermería del Trabajo*, 6(3): 105-114 p.
<https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=5633043>
- Ruiz, N., Velasquez, E., Pando, A., Decaëns, T., Dubs, F. (2009). Indicateurs synthétiques de la qualité du sol. *Etude et Gestion Des Sols*, 16, 323–338 p.
- Rusu, C. (2004). *Neural Network Methods in Surface Modeling. Preliminary Notes*. *Creative Math*, 13: 111-120 p.
https://www.researchgate.net/publication/228423341_Neural_Network_Methods_in_Surface_Modeling_Preliminary_Notes
- Santibáñez, C. (s.f.). Determinación del pH y conductividad eléctrica del suelo. Universidad de Chile. Proyecto MECESUP: Modernización e Integración Transversal de la Enseñanza de Pregrado en Ciencias de la Tierra. http://mct.dgf.uchile.cl/AREAS/medio_mod1.pdf
- Setianto, A., & Triandini, T. (2013). Comparison of kriging and inverse distance weighted interpolation methods in lineament and analysis. *Journal of Applied Geology*, 5(1), 21 - 29.
- Soane, B.D., Blackwell, P.S., Dickson, P.S., Painter, D.J. (1980). Compaction by agricultural vehicles: a review. I. Soil and wheel characteristics. *Soil and Tillage Res.* 1: 207–237 p.

- Soto, A. (2016). Distribución espacial de las propiedades físicas y químicas de los suelos por unidades fisiográficas en la microcuenca Las Pavas, distrito Mariano Dámaso Beraún – Las Palmas. [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Agraria de la Selva]. Repositorio UNAS. <https://repositorio.unas.edu.pe/handle/UNAS/1606>
- Trangmar, B.B., R. S. Yost, Wehara, G. (1985). Application of geostatistics to spatial studies of soil properties. *Advances in agronomy*, 28: 45-94 p. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0065211308606732>
- United States Department of Agriculture – USDA (1999). Soil Taxonomy. A Basic System of Soil Classification for Making and Interpreting Soil Surveys. Segunda edición, 1999, págs.: 869. Disponible en: <http://soils.usda.gov/technical/classification/taxonomy/>
- United States Department of Agriculture – USDA (2006). Keys to Soil Taxonomy. Décima edición, 2006, págs.: 332. Disponible en: http://soils.usda.gov/technical/classification/tax_keys/
- Universidad Carlos III de Madrid – UC3M. (s.f.). Series temporales. <http://halweb.uc3m.es/esp/Personal/personas/jmmarin/esp/EDescrip/tema7.pdf>
- Universidad Nacional de Colombia – UNAL (s.f.). Modelado y Pronóstico de la Tendencia. <https://www.medellin.unal.edu.co/~ndgirald/Archivos%20Lectura/Archivos%20curso%20Series%20EIO/Capitulo2%20Notas%20de%20Clase.pdf>
- Universidade de Santiago de Compostela – USC (s.f.). Regresión lineal simple. Departamento de Estadística e Investigación Operativa, USC. http://eio.usc.es/eipc1/BASE/BASEMASTER/FORMULARIOS-PHP-DPTO/MATERIALES/Mat_50140116_Regr_%20simple_2011_12.pdf
- Upchurch, D. R., Edmonds, W. J. (1992). Statistical procedures for specific objectives. In: *Spatial variabilities of soils and landforms*. SSSA Special publication N° 28. 2° Ed. SSSA. Madison. 49-71 p.
- United States Department of Agriculture. (2014). Inherent factors affecting soil phosphorus. USA. https://www.nrcs.usda.gov/Internet/FSE_DOCUMENTS/nrcs142p2_053254.pdf
- United States Department of Agriculture. (2015). Inherent factors affecting soil nitrogen. USA. https://www.nrcs.usda.gov/Internet/FSE_DOCUMENTS/nrcs142p2_053274.pdf
- Van Groenigen, Gandah M., Bouma J. 2000. Soil sampling strategies for precision agriculture research under Sahelian conditions. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 64: 1674-1680.

- Vargas, R., Serrato, F., Torrente, A. (2015). Variabilidad espacial de las propiedades físicas de un suelo Fluventic Ustropepts en la cuenca baja del río Las Ceibas – Huila. Revista Ingeniería y Región, 13(1): 113-123 p.
<https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=5432275>
- Villacorta, S. (2014). Distribución espacial de las propiedades físico químicas del suelo de los palmicultores de Shambillo. [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Agraria de la Selva]. Repositorio UNAS. <http://repositorio.unas.edu.pe/handle/UNAS/1073>
- Villatoro, M., Henríquez, C., Sancho, F. (2008). Comparación de los interpoladores IDW y Kriging en la variación espacial de pH, Ca, CICE y P del suelo. Agronomía Costarricense 32(1): 95-105 p.
- Webster, R. and M. Oliver. (2007). Geostatistics for environmental scientists. 2nd ed. John Wiley & Sons, Ltd. England. 315 p.
- Yakabi, K. (2014). Estudio de las propiedades edáficas que determinan la fertilidad del suelo en el sistema de andenería de la comunidad campesina San Pedro de Laraos, provincia de Huarochirí, Lima. [Tesis de pregrado, Pontificia Universidad Católica del Perú]. Repositorio PUCP. <https://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/handle/20.500.12404/5836>
- Yazici, B., Yolacan, S. (2007). A comparison of various tests of normality. Journal of Statistical Computation and Simulation, 77(2): 175-183 p.
- Yost, R. S.; Uehara, G., Fox, R.L. (1982). Geostatistical analysis of soil chemical properties of large land areas. II. Kriging. Soil Sci. Soc. Am. J. 46: 1033-1037 p.
<https://doi.org/10.2136/sssaj1982.03615995004600050029x>
- Zavaleta, G. (1992). Edafología. El suelo en relación con la producción. Consejo Nacional de Concentración y Tecnología. Lima, Perú. 1° ed., 223 p.
- Zúñiga, L.B. (2007). Caracterización y distribución espacial de suelos aluviales hidromórficos con palma aceitera (*Elaeis guineensis* Jacq.) En palma del espino. [Tesis de maestría, Universidad Nacional Agraria de la Molina]. Repositorio UNALM. <https://repositorio.lamolina.edu.pe/handle/UNALM/1708>

ANEXOS

Anexo 1. Datos generales del análisis de suelo

Muestra	Tipo de muestra	pH (1:1)	M.O. (%)	N (%)	P (Ppm)	K (Ppm)	Este (m)	Norte (m)
M1	Interpolación	4.51	1.13	0.06	6.24	108.95	329055	9088041
M2	Interpolación	4.47	1.22	0.06	2.95	70.72	329167	9088010
M3	Interpolación	4.37	1.26	0.06	3.60	85.96	329112	9087955
M4	Interpolación	4.11	1.22	0.06	5.76	59.22	329064	9087849
M5	Interpolación	4.43	1.17	0.06	5.84	89.71	329170	9087911
M6	Interpolación	4.47	1.53	0.08	4.48	92.46	329210	9087872
M7	Interpolación	4.06	1.32	0.07	5.28	73.97	329163	9087811
M8	Interpolación	3.96	1.14	0.06	3.36	40.98	329261	9087809
M9	Interpolación	4.29	1.27	0.06	5.20	94.46	329306	9087872
M10	Interpolación	4.00	1.02	0.05	4.32	41.98	329301	9087774
M11	Interpolación	3.99	1.23	0.06	4.08	37.73	329407	9087859
M12	Interpolación	4.05	1.66	0.08	8.97	63.97	329402	9087758
M13	Interpolación	3.84	1.18	0.06	3.60	90.96	329466	9087908
M14	Interpolación	4.19	1.63	0.08	3.44	67.72	329529	9087995
M15	Interpolación	4.22	1.29	0.06	4.16	96.96	329461	9088103
M16	Comparación	4.08	1.72	0.09	1.99	31.49	329061	9087988
M17	Comparación	4.54	1.32	0.07	2.79	105.20	329106	9088037
M18	Comparación	4.16	1.58	0.08	2.95	89.46	329194	9087944
M19	Comparación	3.99	1.65	0.08	4.48	112.95	329097	9087891
M20	Comparación	4.49	1.32	0.07	2.07	39.98	329143	9087861
M21	Comparación	4.61	1.78	0.09	2.39	46.98	329264	9087906
M22	Comparación	4.51	1.36	0.07	2.47	63.47	329266	9087850
M23	Comparación	4.23	1.70	0.08	2.15	100.71	329203	9087772
M24	Comparación	4.34	1.40	0.07	2.55	56.48	329325	9087812
M25	Comparación	4.88	1.18	0.06	2.87	70.47	329392	9087816
M26	Comparación	5.52	1.50	0.07	2.79	63.97	329465	9087851
M27	Comparación	4.61	1.58	0.08	1.99	47.98	329403	9087936
M28	Comparación	4.48	1.24	0.06	2.63	35.98	329460	9087970
M29	Comparación	4.53	1.18	0.06	2.31	68.22	329476	9088027
M30	Comparación	4.52	2.00	0.10	2.47	55.98	329529	9088079

Anexo 2. Panel fotográfico



Foto 1. Extracción de muestras de suelo



Foto 2. Extracción de muestras de suelo utilizando barrenador



Foto 3. Extracción de muestras de suelo utilizando barrenador



Foto 4. Recolección de muestra N° 12



Foto 5. Extracción de muestras de suelo utilizando barrenador



Foto 6. Recolección de muestra N° 24



Foto 7. Preparación de equipo para levantamiento topográfico



Foto 8. Medición de campo para levantamiento topográfico



Foto 9. Medición de campo para levantamiento topográfico



Foto 10. Medición de campo para levantamiento topográfico



Foto 11. Medición de campo para levantamiento topográfico



Foto 12. Medición de campo para levantamiento topográfico



Foto 13. Medición de campo para levantamiento topográfico



Foto 14. Selección de muestras para la medición de materia orgánica (MO)



Foto 15. Extracción de alícuotas para la materia orgánica (MO)



Foto 16. Muestras para la determinación de materia orgánica (MO)



Foto 17. Determinación del nitrógeno (N)

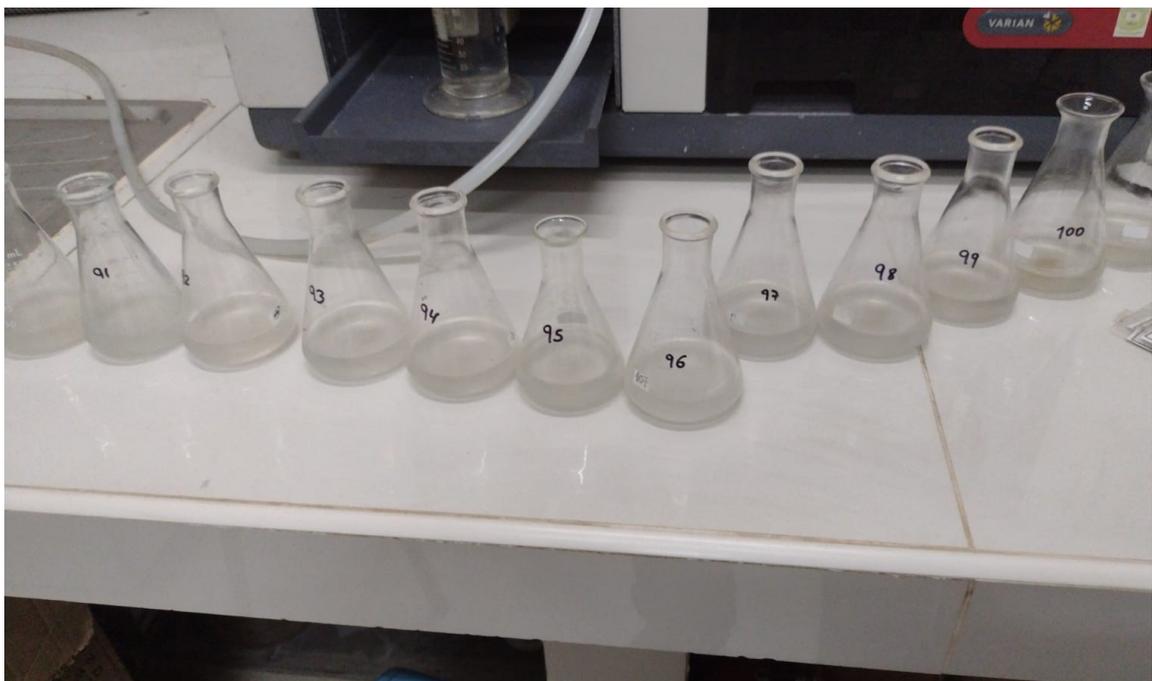


Foto 18. Determinación del nitrógeno (N)



Foto 19. Tubos utilizados para la medición de la textura del suelo

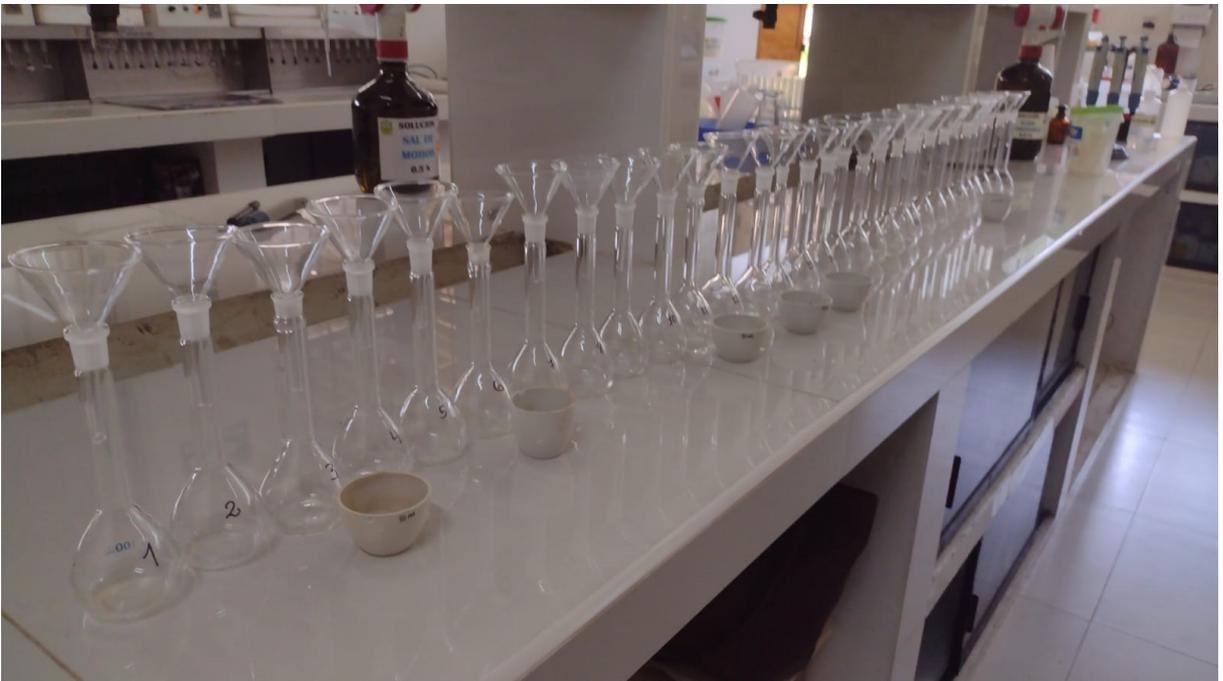


Foto 20. Extracción de alícuotas para determinar el potasio (K)



Foto 21. Medición del pH de las muestras

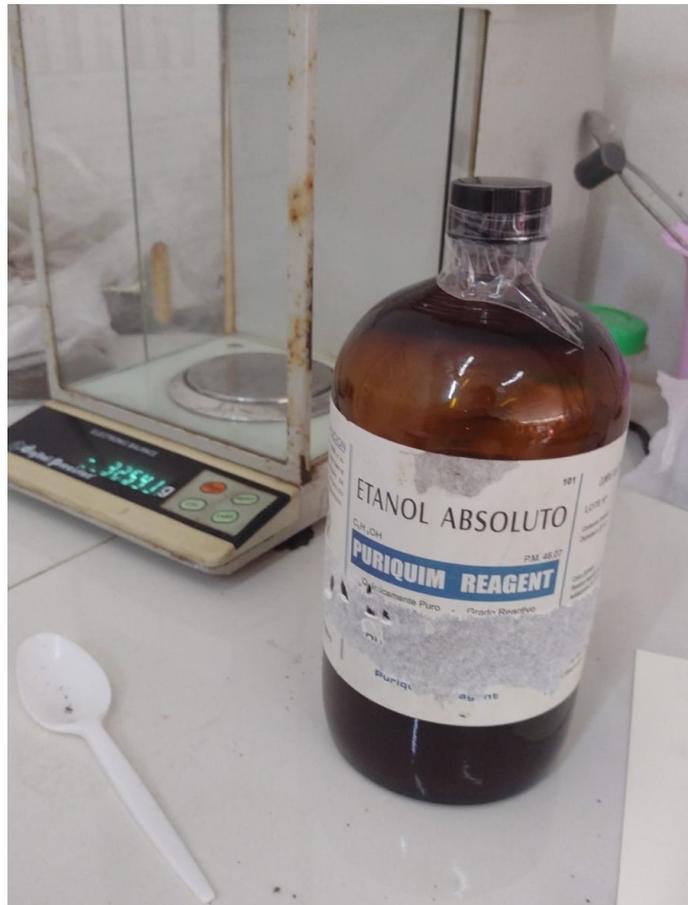


Foto 22. Insumo utilizado para la determinación de fósforo (P)



Foto 23. Equipo utilizado para análisis espectrofotométrico

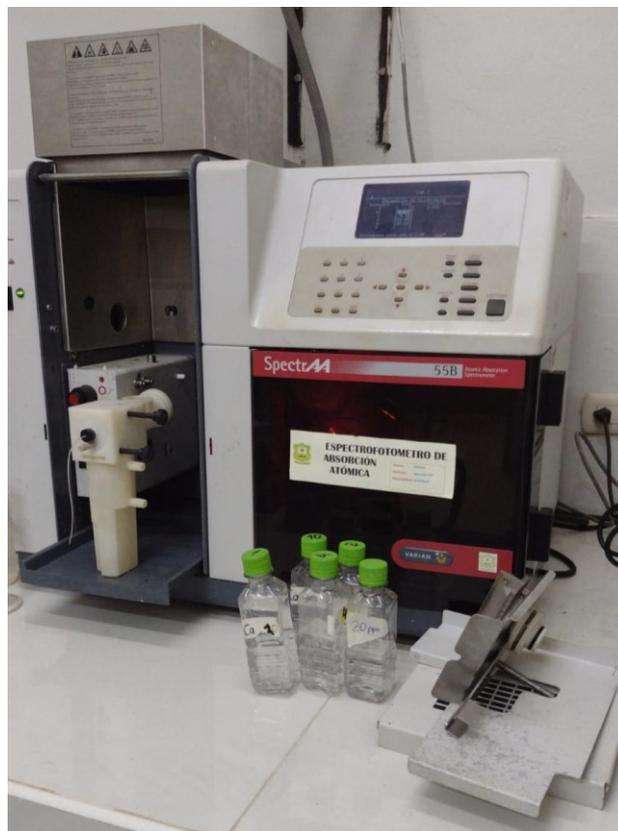


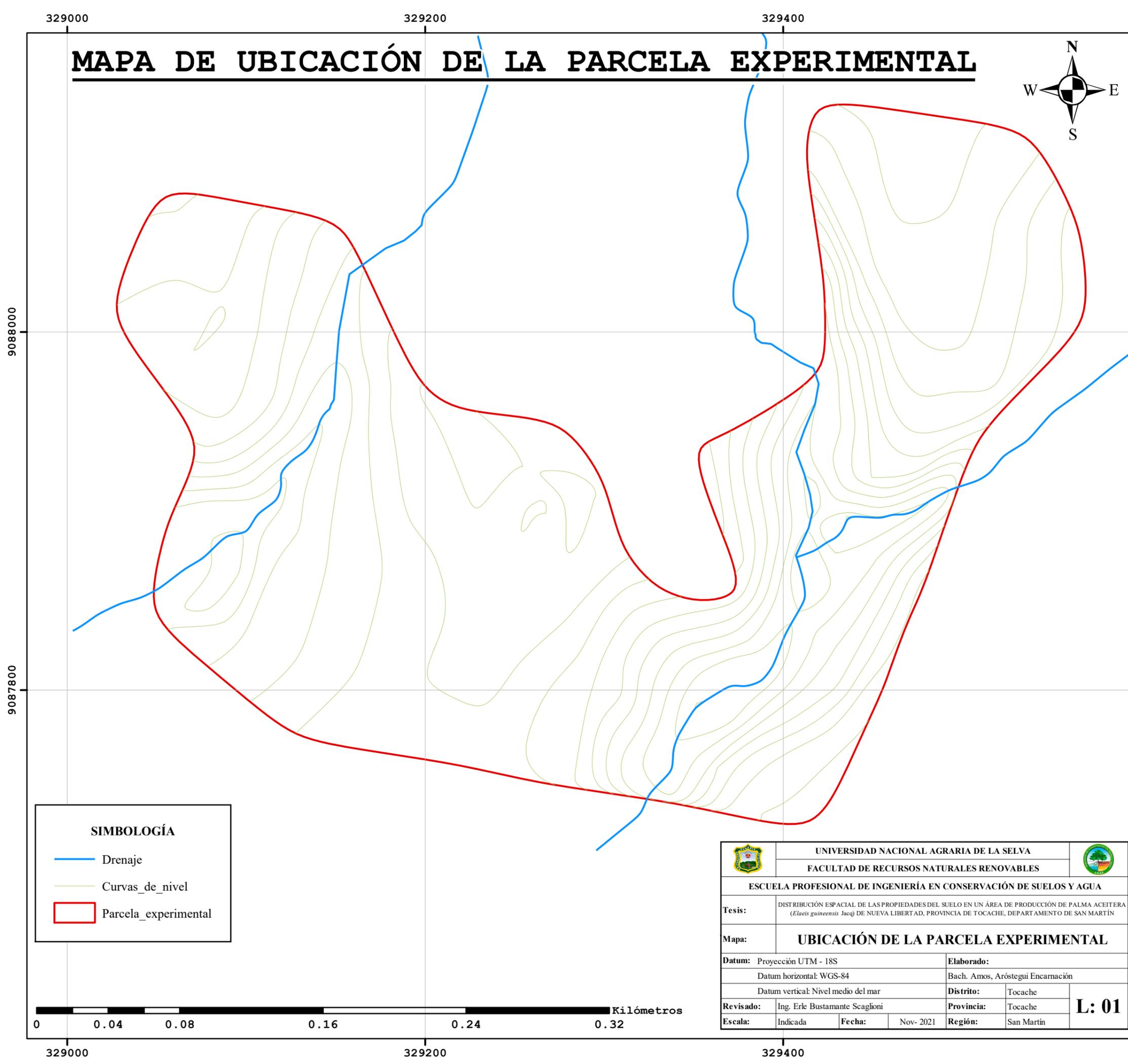
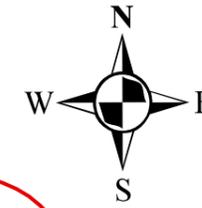
Foto 24. Equipo utilizado para análisis espectrofotométrico



Foto 25. Pesado de muestra para determinación de fosforo (P)

Anexo 3. Mapa de ubicación de la parcela experimental

MAPA DE UBICACIÓN DE LA PARCELA EXPERIMENTAL



SIMBOLOGÍA	
	Drenaje
	Curvas_de_nivel
	Parcela_experimental

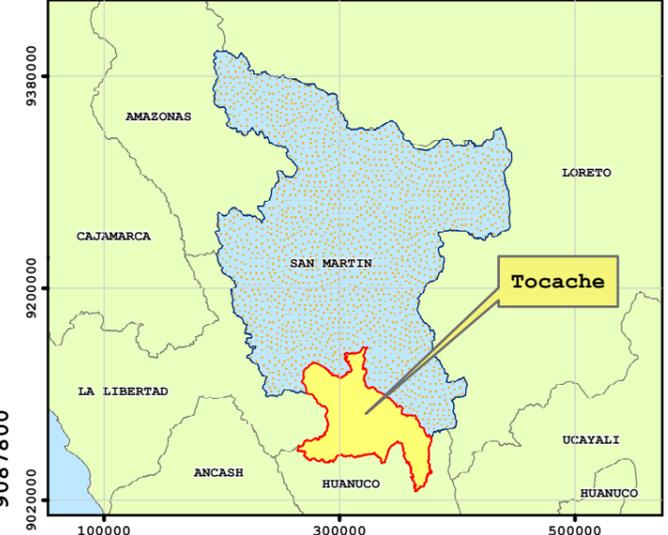


		UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA			
FACULTAD DE RECURSOS NATURALES RENOVABLES		ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA EN CONSERVACIÓN DE SUELOS Y AGUA			
Tesis:	DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LAS PROPIEDADES DEL SUELO EN UN ÁREA DE PRODUCCIÓN DE PALMA ACEITERA (<i>Elaeis guineensis</i> Jacq) DE NUEVA LIBERTAD, PROVINCIA DE TOCACHE, DEPARTAMENTO DE SAN MARTÍN				
Mapa:	UBICACIÓN DE LA PARCELA EXPERIMENTAL				
Datum:	Proyección UTM - 18S		Elaborado:		
	Datum horizontal: WGS-84		Bach. Amos, Aróstegui Encarnación		
	Datum vertical: Nivel medio del mar		Distrito:	Tocache	
Revisado:	Ing. Erle Bustamante Scaglioni		Provincia:	Tocache	
Escala:	Indicada	Fecha:	Nov- 2021	Región:	San Martín
					L: 01

UBICACIÓN DEPARTAMENTAL



UBICACIÓN PROVINCIAL

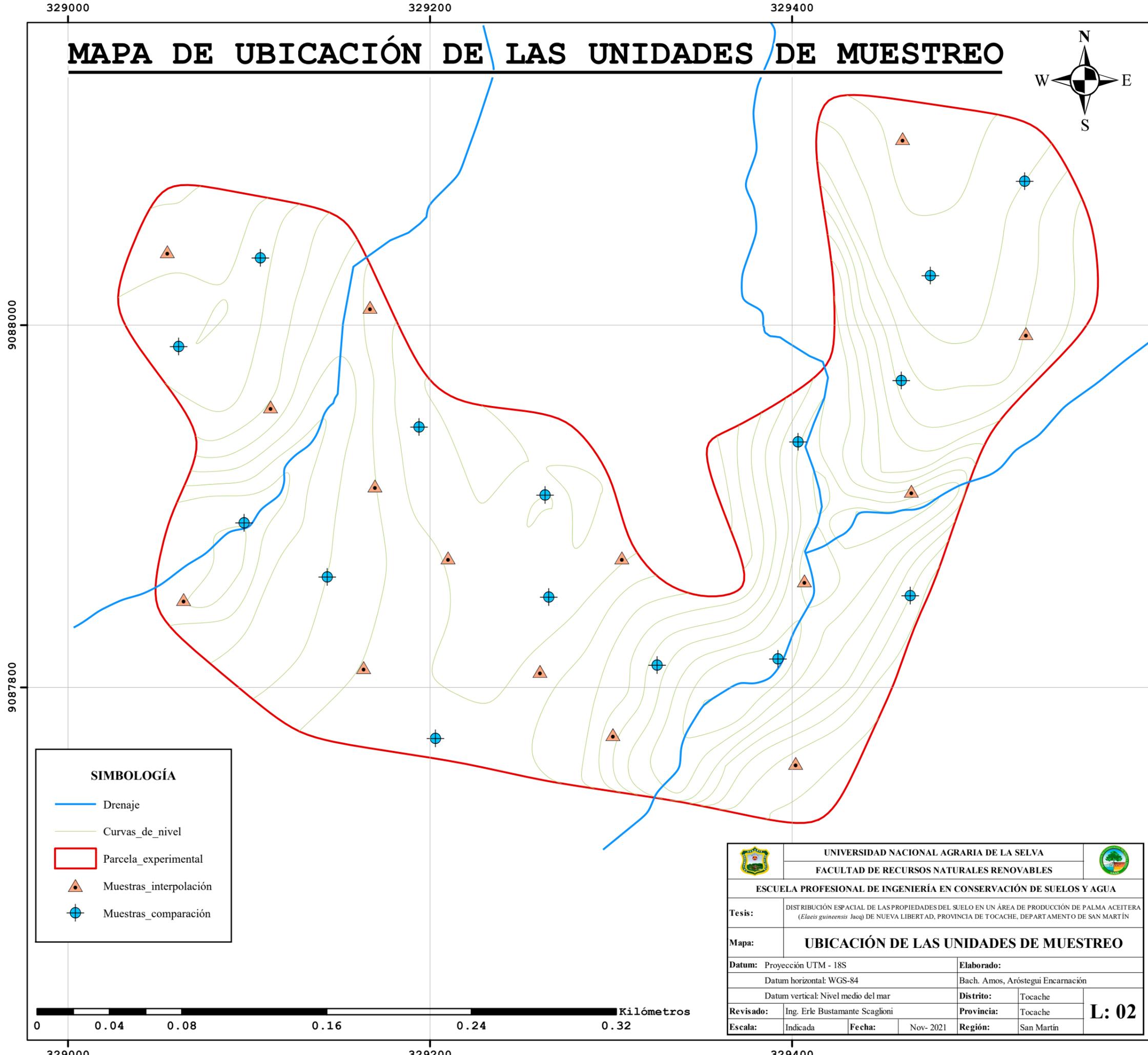


UBICACIÓN DISTRITAL



Anexo 4. Mapa de ubicación de las unidades de muestreo

MAPA DE UBICACIÓN DE LAS UNIDADES DE MUESTREO



SIMBOLOGÍA

- Drenaje
- Curvas_de_nivel
- Parcela_experimental
- ▲ Muestras_interpolación
- Muestras_comparación

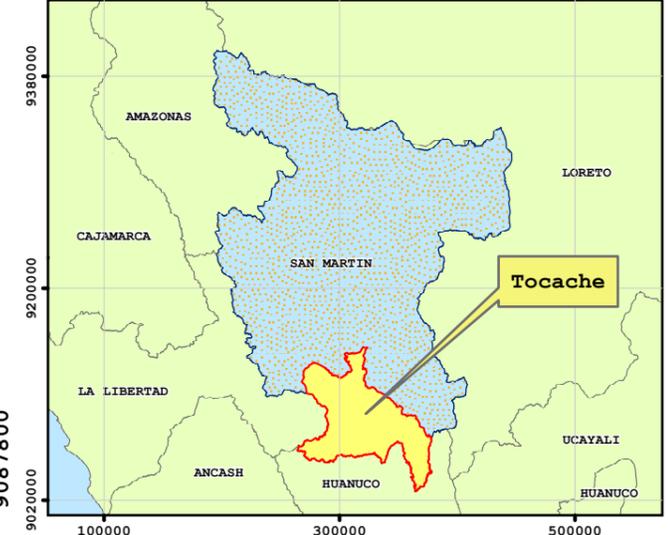


		UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA			
FACULTAD DE RECURSOS NATURALES RENOVABLES		ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA EN CONSERVACIÓN DE SUELOS Y AGUA			
Tesis:	DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LAS PROPIEDADES DEL SUELO EN UN ÁREA DE PRODUCCIÓN DE PALMA ACEITERA (<i>Elaeis guineensis</i> Jacq) DE NUEVA LIBERTAD, PROVINCIA DE TOCACHE, DEPARTAMENTO DE SAN MARTÍN				
Mapa:	UBICACIÓN DE LAS UNIDADES DE MUESTREO				
Datum:	Proyección UTM - 18S		Elaborado:		
	Datum horizontal: WGS-84		Bach. Amos, Aróstegui Encarnación		
	Datum vertical: Nivel medio del mar		Distrito:	Tocache	
Revisado:	Ing. Erle Bustamante Scaglioni		Provincia:	Tocache	
Escala:	Indicada	Fecha:	Nov- 2021	Región:	San Martín
					L: 02

UBICACIÓN DEPARTAMENTAL



UBICACIÓN PROVINCIAL

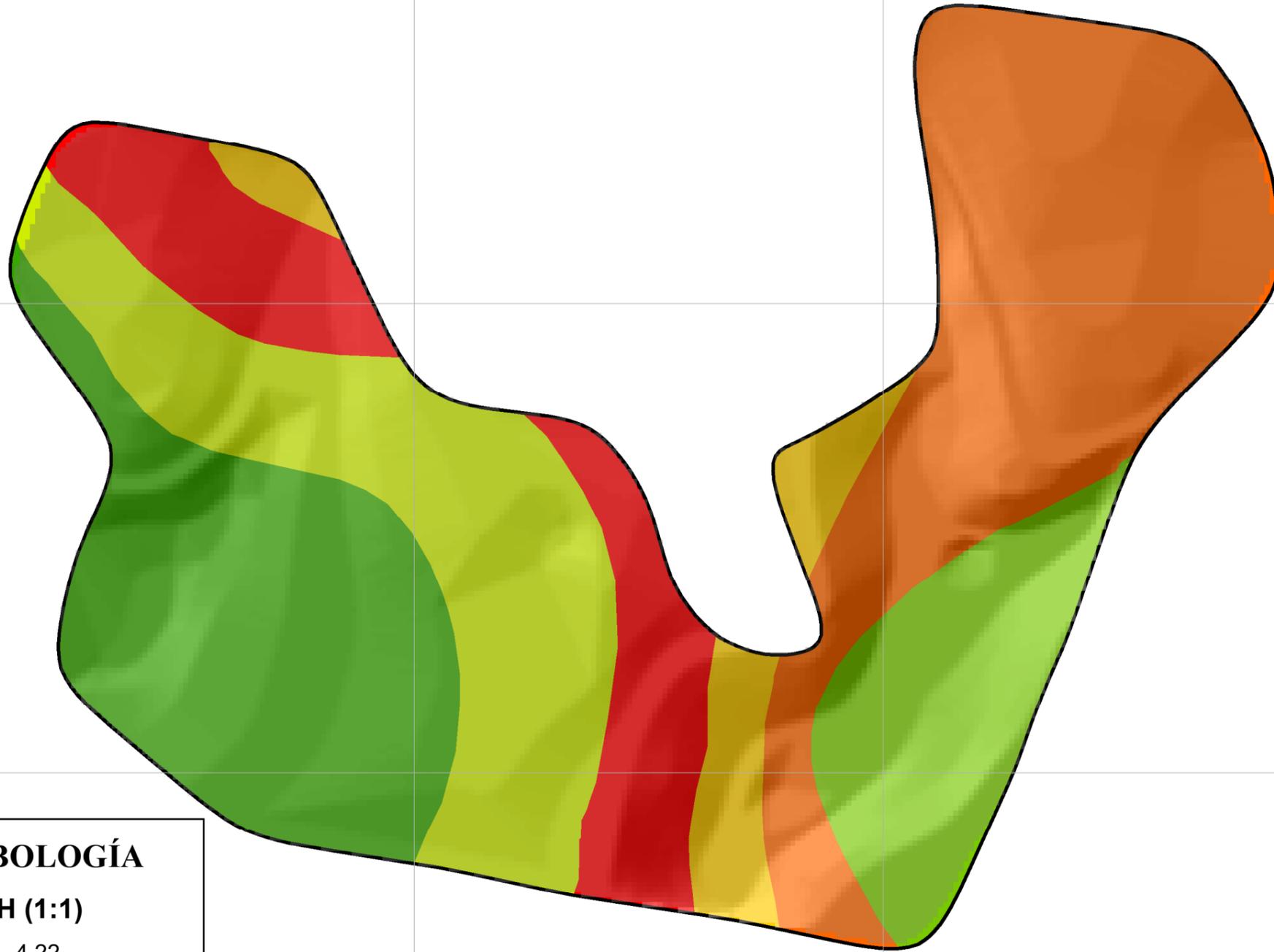


UBICACIÓN DISTRITAL



Anexo 5. Mapa de ubicación de los mapas de interpolación

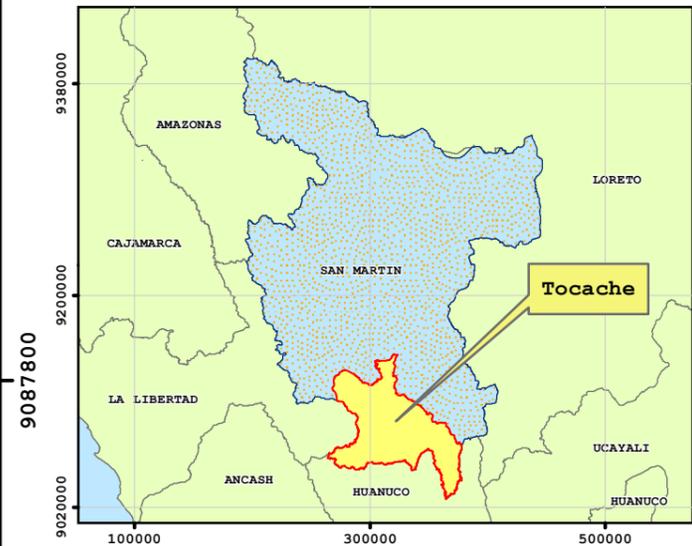
MAPA DE INTERPOLACIÓN DE pH CON KRIGING



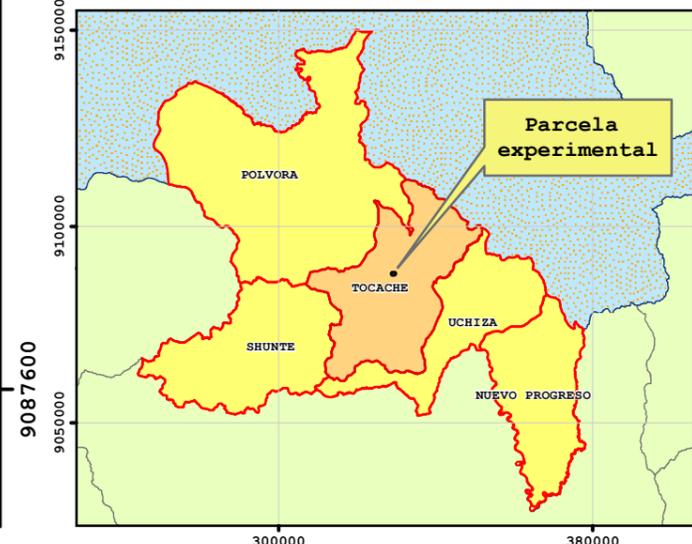
UBICACIÓN DEPARTAMENTAL



UBICACIÓN PROVINCIAL



UBICACIÓN DISTRITAL

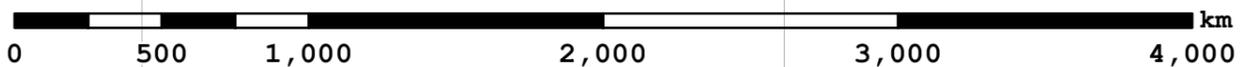


SIMBOLOGÍA

pH (1:1)

-  4.1 - 4.22
-  4.23 - 4.32
-  4.33 - 4.41
-  4.42 - 4.49
-  4.5 - 4.56
-  4.57 - 4.64
-  Parcela_experimental

		UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA			
FACULTAD DE RECURSOS NATURALES RENOVABLES					
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA EN CONSERVACIÓN DE SUELOS Y AGUA					
Tesis:	DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LAS PROPIEDADES DEL SUELO EN UN ÁREA DE PRODUCCIÓN DE PALMA ACEITERA (<i>Elaeis guineensis</i> Jacq) DE NUEVA LIBERTAD, PROVINCIA DE TOCACHE, DEPARTAMENTO DE SAN MARTÍN				
Mapa:	UBICACIÓN DE LAS UNIDADES DE MUESTREO				
Datum:	Proyección UTM - 18S		Elaborado:		
	Datum horizontal: WGS-84		Bach. Amos, Aróstegui Encarnación		
	Datum vertical: Nivel medio del mar		Distrito:	Tocache	
Revisado:	Ing. Erle Bustamante Scaglioni		Provincia:	Tocache	
Escala:	Indicada	Fecha:	Nov- 2021	Región:	San Martín
					L: 03



329000 329200 329400 329600

9088000

9087800

9087600

9088000

9087800

9087600

80°0'0"W

70°0'0"W

9380000

9200000

9020000

100000

300000

500000

9150000

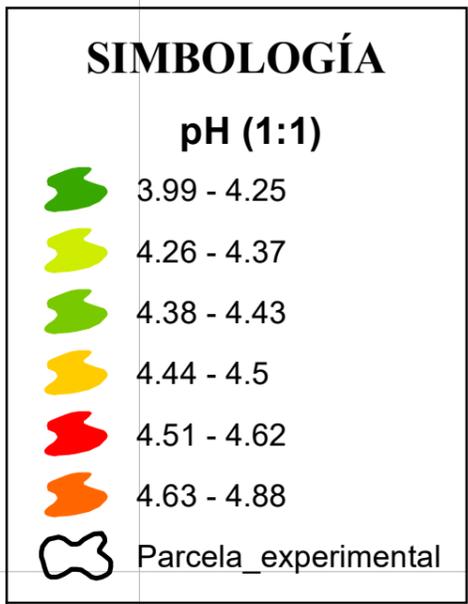
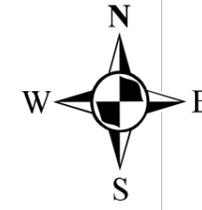
9100000

9050000

300000

380000

MAPA DE INTERPOLACIÓN DE pH CON IDW

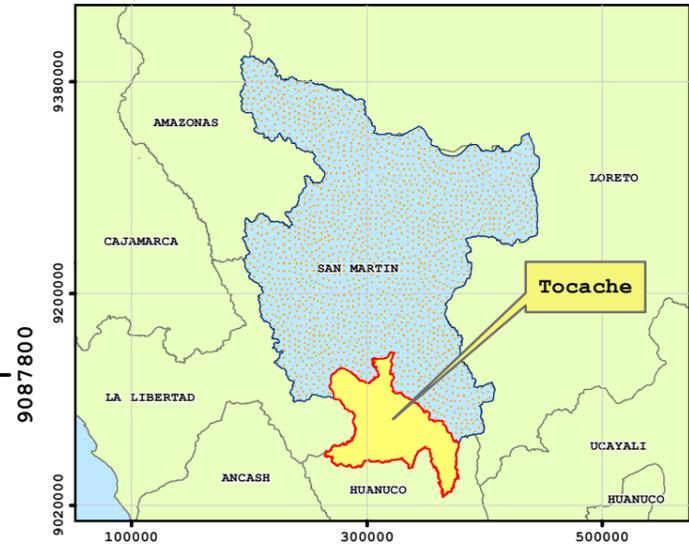


		UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA			
		FACULTAD DE RECURSOS NATURALES RENOVABLES			
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA EN CONSERVACIÓN DE SUELOS Y AGUA					
Tesis:	DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LAS PROPIEDADES DEL SUELO EN UN ÁREA DE PRODUCCIÓN DE PALMA ACEITERA (<i>Elaeis guineensis</i> Jacq) DE NUEVA LIBERTAD, PROVINCIA DE TOCACHE, DEPARTAMENTO DE SAN MARTÍN				
Mapa:	UBICACIÓN DE LAS UNIDADES DE MUESTREO				
Datum:	Proyección UTM - 18S		Elaborado:		
	Datum horizontal: WGS-84		Bach. Amos, Aróstegui Encarnación		
	Datum vertical: Nivel medio del mar		Distrito:	Tocache	
Revisado:	Ing. Erle Bustamante Scaglioni		Provincia:	Tocache	
Escala:	Indicada	Fecha:	Nov- 2021	Región:	San Martín
					L: 04

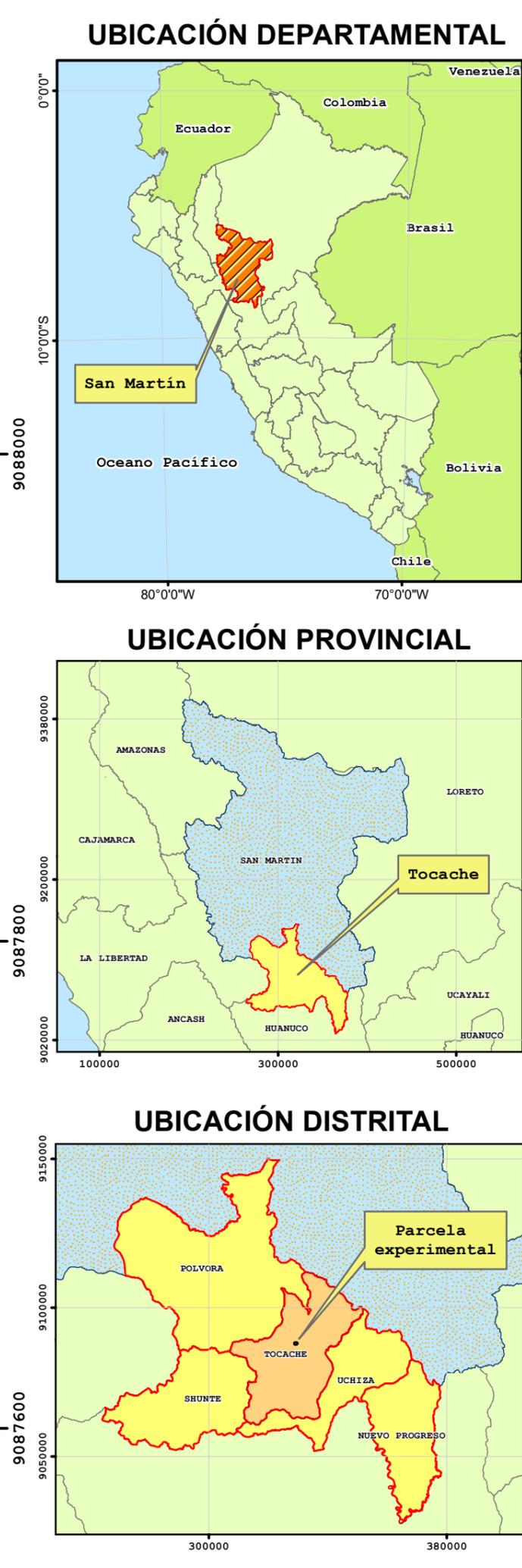
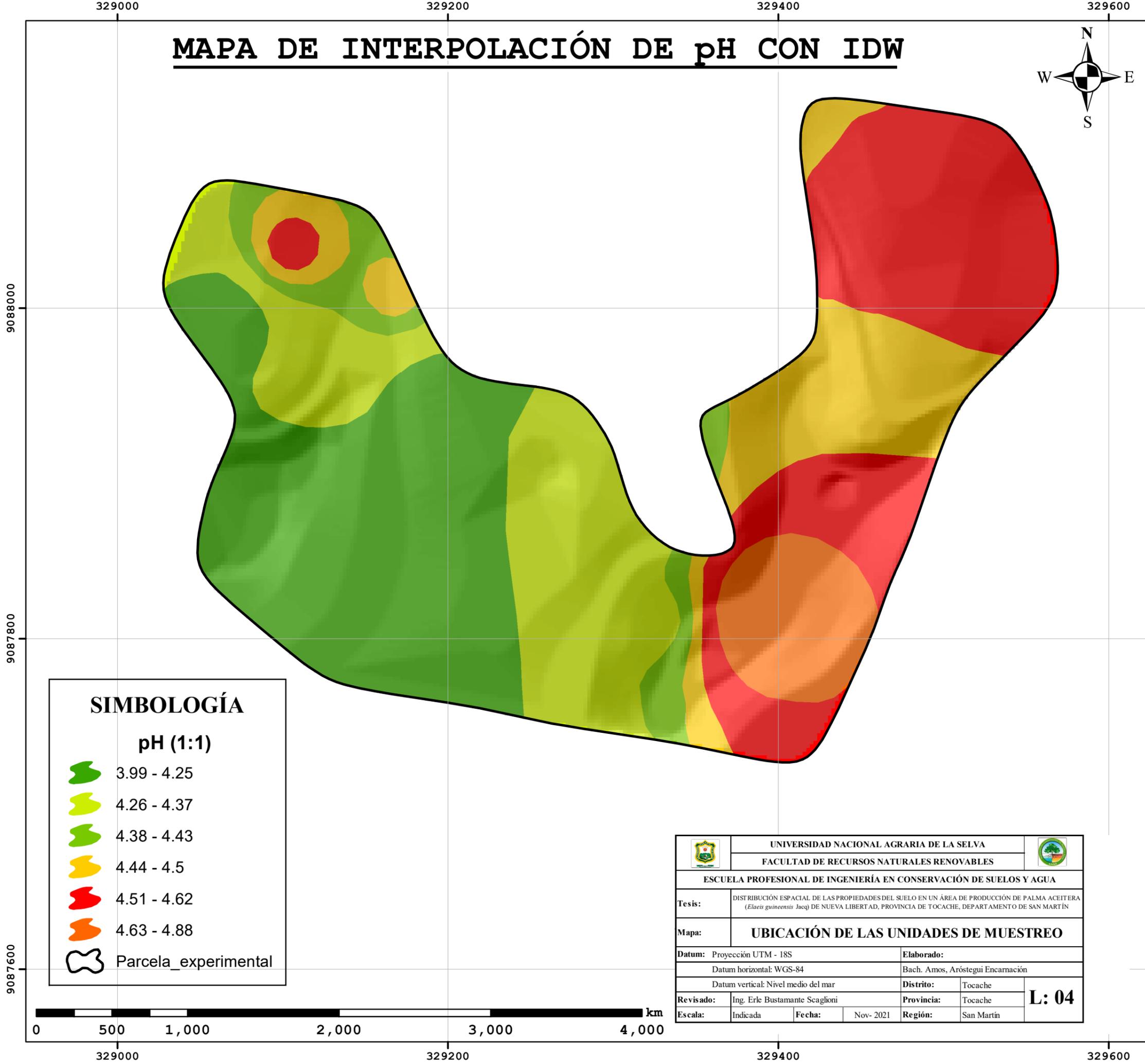
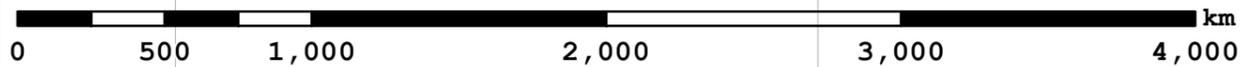
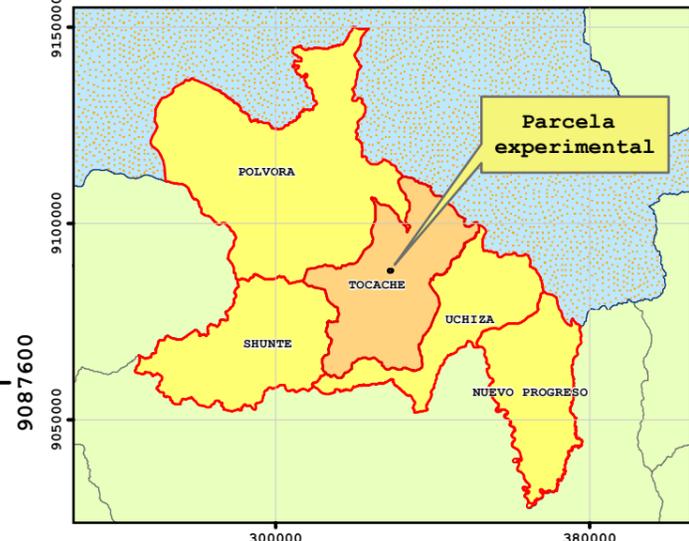
UBICACIÓN DEPARTAMENTAL



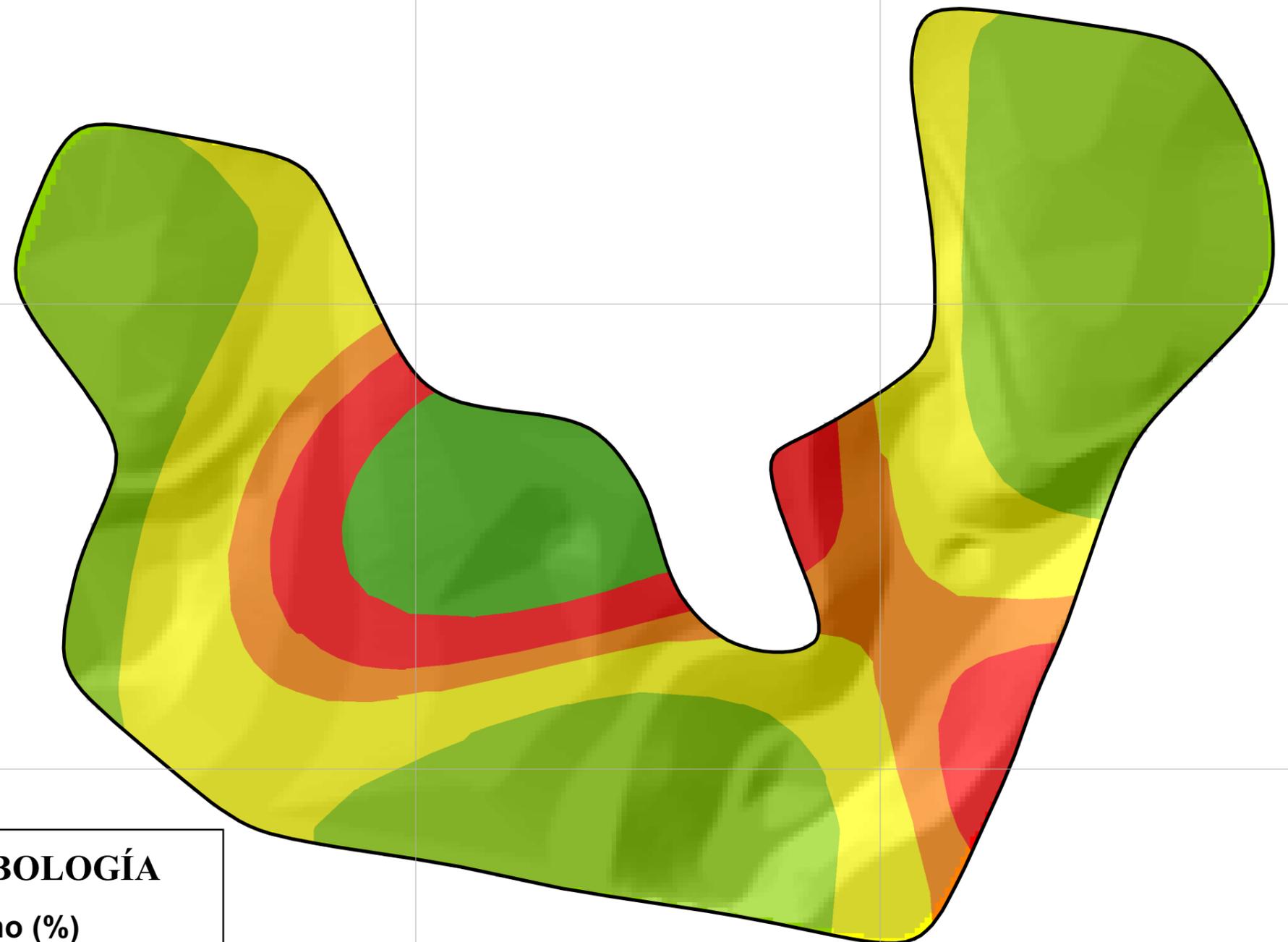
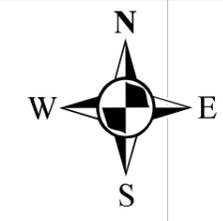
UBICACIÓN PROVINCIAL



UBICACIÓN DISTRITAL



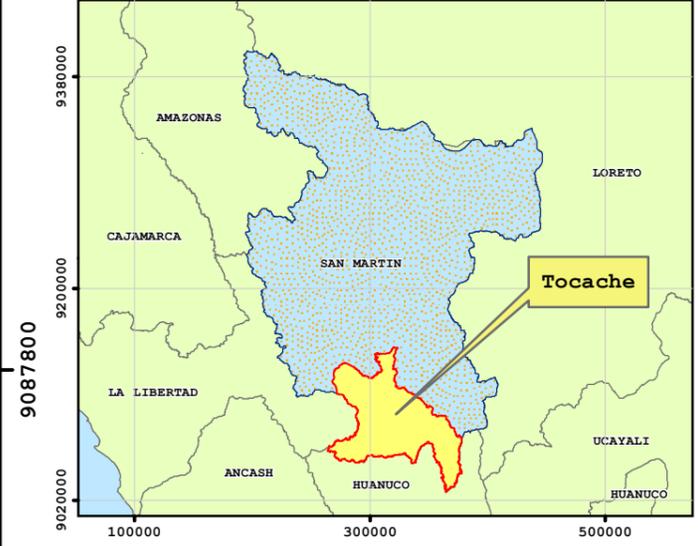
MAPA DE INTERPOLACIÓN DE M.O CON KRIGING



UBICACIÓN DEPARTAMENTAL



UBICACIÓN PROVINCIAL



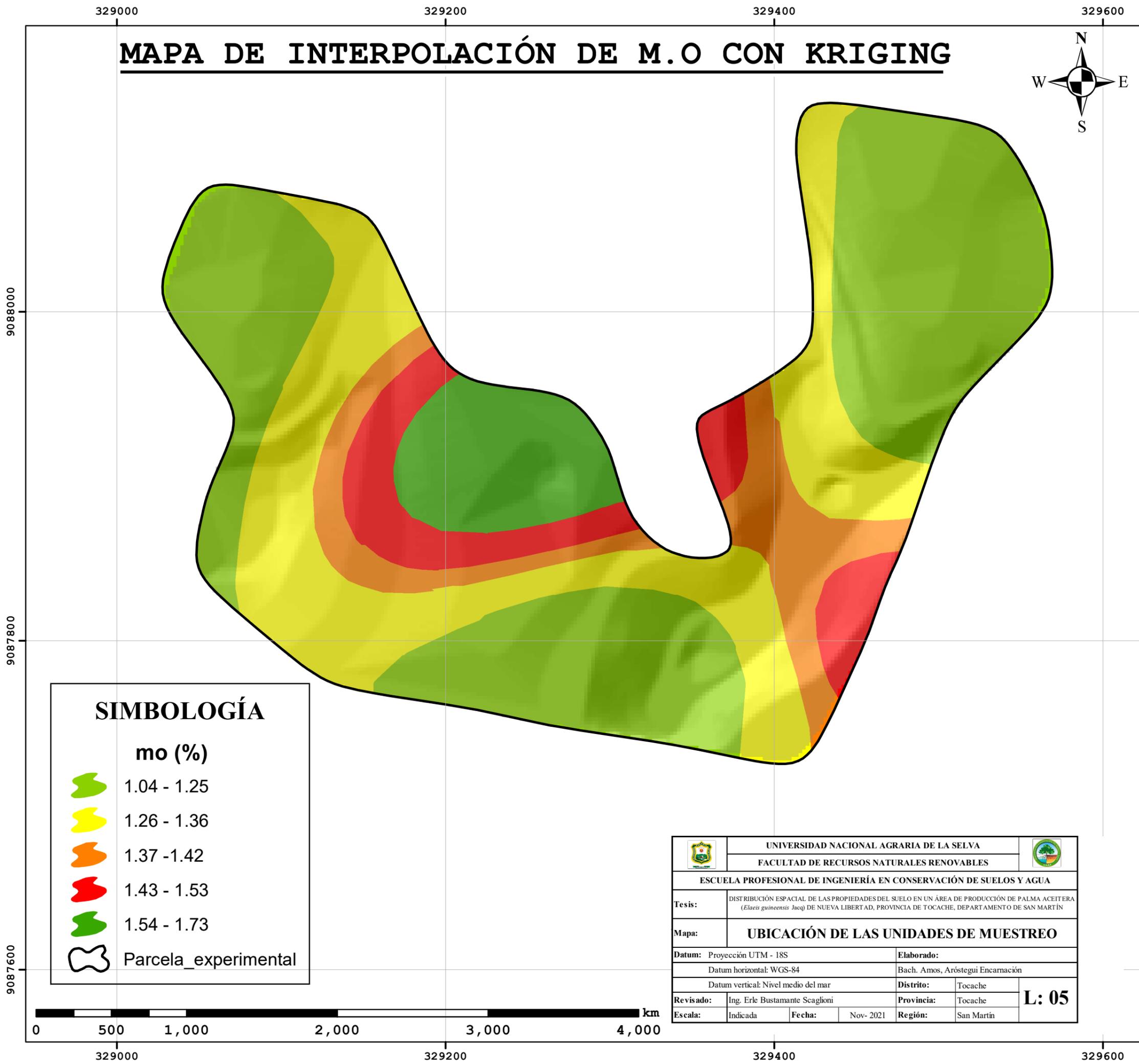
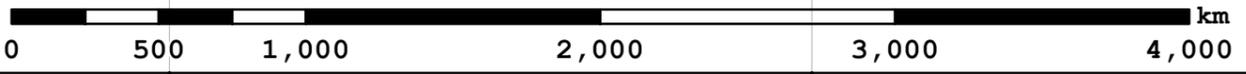
UBICACIÓN DISTRITAL



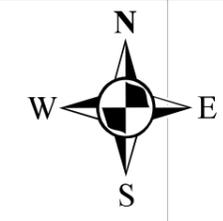
SIMBOLOGÍA

	1.04 - 1.25
	1.26 - 1.36
	1.37 - 1.42
	1.43 - 1.53
	1.54 - 1.73
	Parcela_experimental

		UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA			
FACULTAD DE RECURSOS NATURALES RENOVABLES		ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA EN CONSERVACIÓN DE SUELOS Y AGUA			
Tesis:	DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LAS PROPIEDADES DEL SUELO EN UN ÁREA DE PRODUCCIÓN DE PALMA ACEITERA (<i>Elaeis guineensis</i> Jacq) DE NUEVA LIBERTAD, PROVINCIA DE TOCACHE, DEPARTAMENTO DE SAN MARTÍN				
Mapa:	UBICACIÓN DE LAS UNIDADES DE MUESTREO				
Datum:	Proyección UTM - 18S	Elaborado:			
	Datum horizontal: WGS-84	Bach. Amos, Aróstegui Encarnación			
	Datum vertical: Nivel medio del mar	Distrito:	Tocache	L: 05	
Revisado:	Ing. Erle Bustamante Seaglioni	Provincia:	Tocache		
Escala:	Indicada	Fecha:	Nov- 2021		



MAPA DE INTERPOLACIÓN DE M.O CON IDW

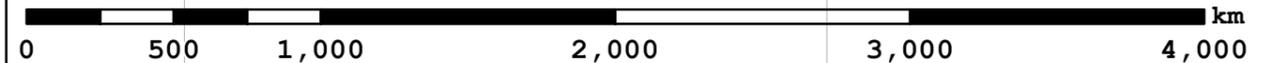


SIMBOLOGÍA

Parcela_experimental

M.O (%)

- 1.02 - 1.28
- 1.29 - 1.38
- 1.39 - 1.42
- 1.43 - 1.52
- 1.53 - 1.78

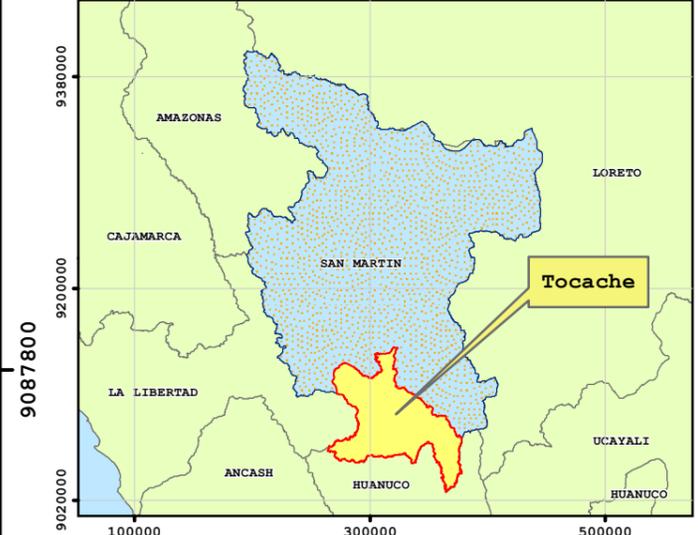


		UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA			
		FACULTAD DE RECURSOS NATURALES RENOVABLES			
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA EN CONSERVACIÓN DE SUELOS Y AGUA					
Tesis:	DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LAS PROPIEDADES DEL SUELO EN UN ÁREA DE PRODUCCIÓN DE PALMA ACEITERA (<i>Elaeis guineensis</i> Jacq) DE NUEVA LIBERTAD, PROVINCIA DE TOCACHE, DEPARTAMENTO DE SAN MARTÍN				
Mapa:	UBICACIÓN DE LAS UNIDADES DE MUESTREO				
Datum:	Proyección UTM - 18S		Elaborado:		
	Datum horizontal: WGS-84		Bach. Amos, Aróstegui Encarnación		
	Datum vertical: Nivel medio del mar		Distrito:	Tocache	
Revisado:	Ing. Erle Bustamante Seaglioni		Provincia:	Tocache	
Escala:	Indicada	Fecha:	Nov- 2021	Región:	San Martín
					L: 06

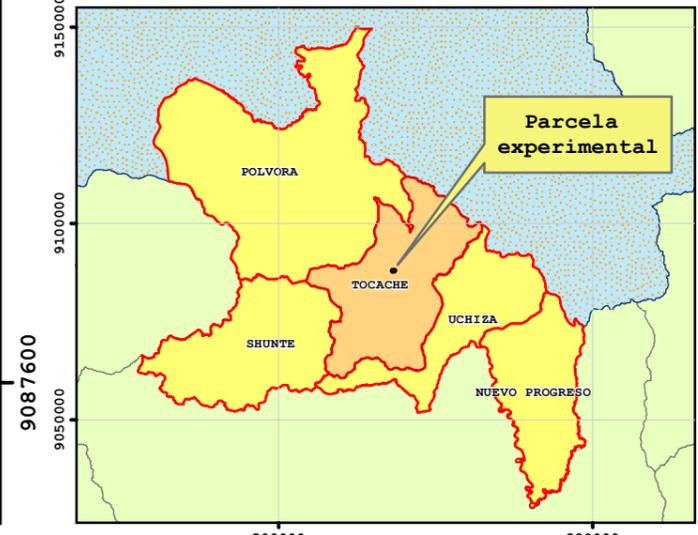
UBICACIÓN DEPARTAMENTAL



UBICACIÓN PROVINCIAL

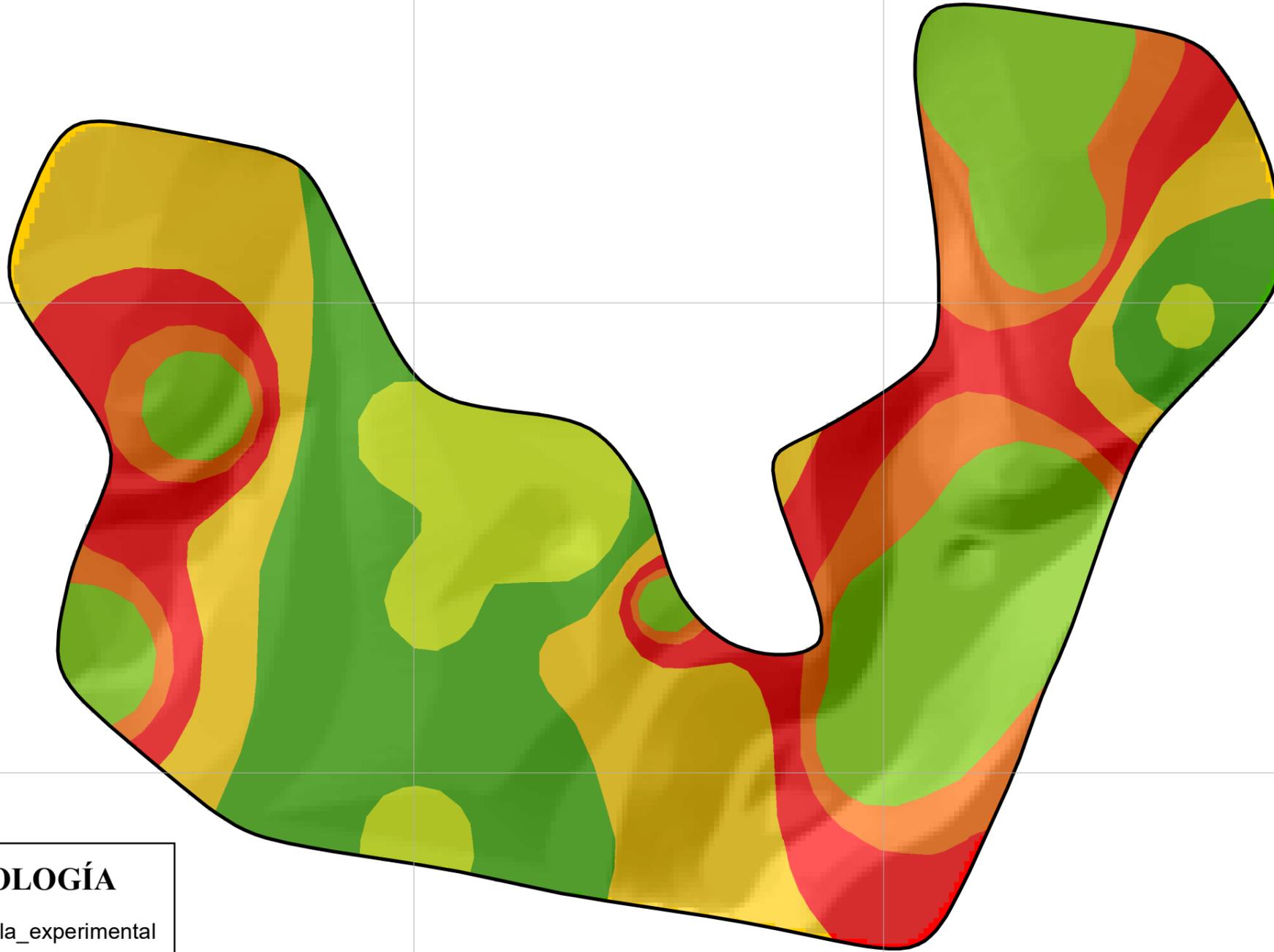
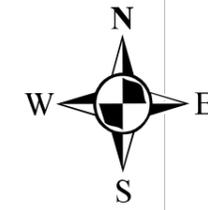


UBICACIÓN DISTRITAL



329000 329200 329400 329600

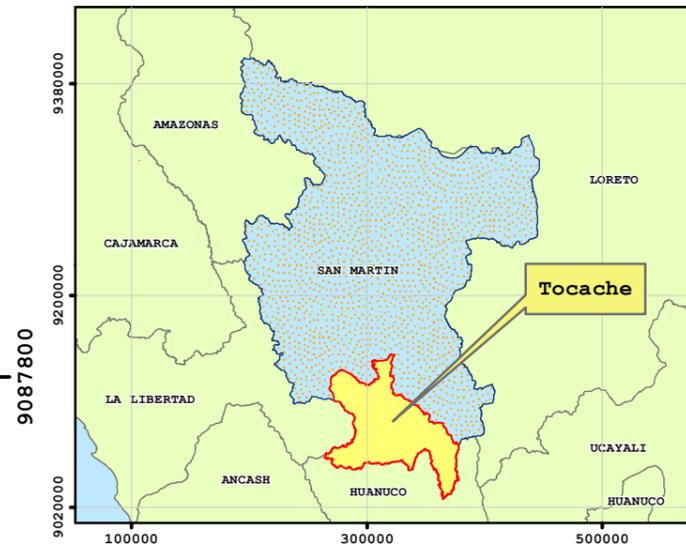
MAPA DE INTERPOLACIÓN DE NITROGENO CON IDW



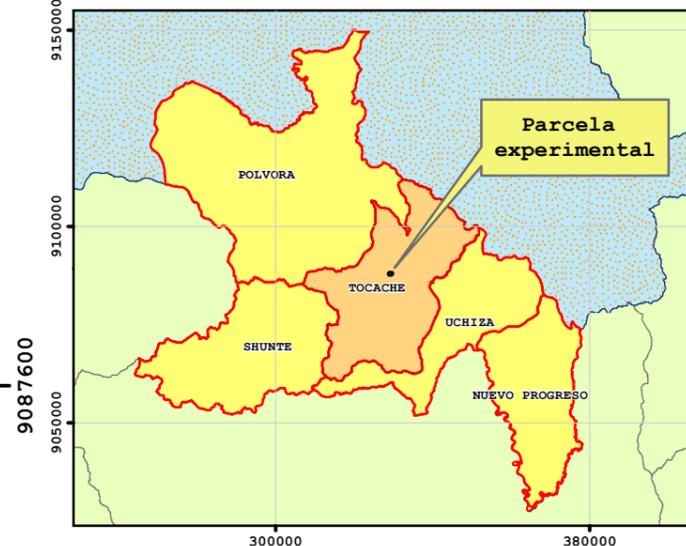
UBICACIÓN DEPARTAMENTAL



UBICACIÓN PROVINCIAL



UBICACIÓN DISTRITAL



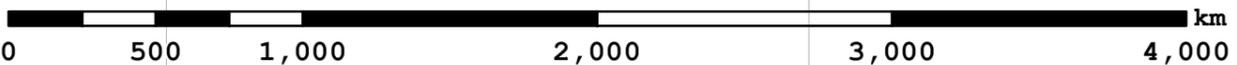
SIMBOLOGÍA

Parcela_experimental

N (%)

- 0.06 - 0.063
- 0.064 - 0.064
- 0.065 - 0.067
- 0.068 - 0.071
- 0.072 - 0.078
- 0.079 - 0.09

		UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA			
FACULTAD DE RECURSOS NATURALES RENOVABLES					
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA EN CONSERVACIÓN DE SUELOS Y AGUA					
Tesis:	DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LAS PROPIEDADES DEL SUELO EN UN ÁREA DE PRODUCCIÓN DE PALMA ACEITERA (<i>Elaeis guineensis</i> Jacq) DE NUEVA LIBERTAD, PROVINCIA DE TOCACHE, DEPARTAMENTO DE SAN MARTÍN				
Mapa:	UBICACIÓN DE LAS UNIDADES DE MUESTREO				
Datum:	Proyección UTM - 18S		Elaborado:		
	Datum horizontal: WGS-84		Bach. Amos, Aróstegui Encarnación		
	Datum vertical: Nivel medio del mar		Distrito:	Tocache	
Revisado:	Ing. Erle Bustamante Scaglioni		Provincia:	Tocache	
Escala:	Indicada	Fecha:	Nov- 2021	Región:	San Martín
					L: 07



329000 329200 329400 329600

9088000

9087800

9087600

9088000

9087800

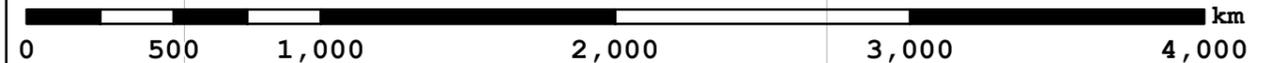
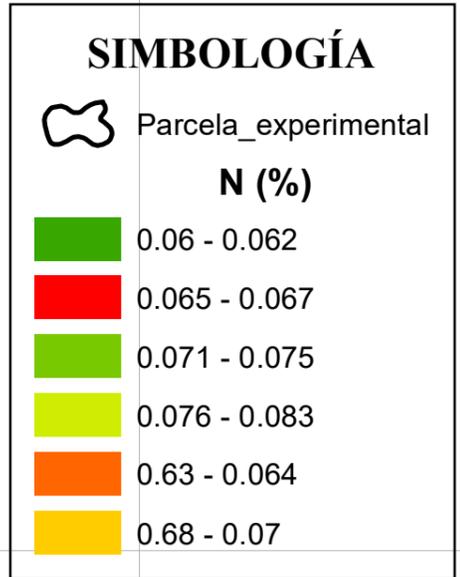
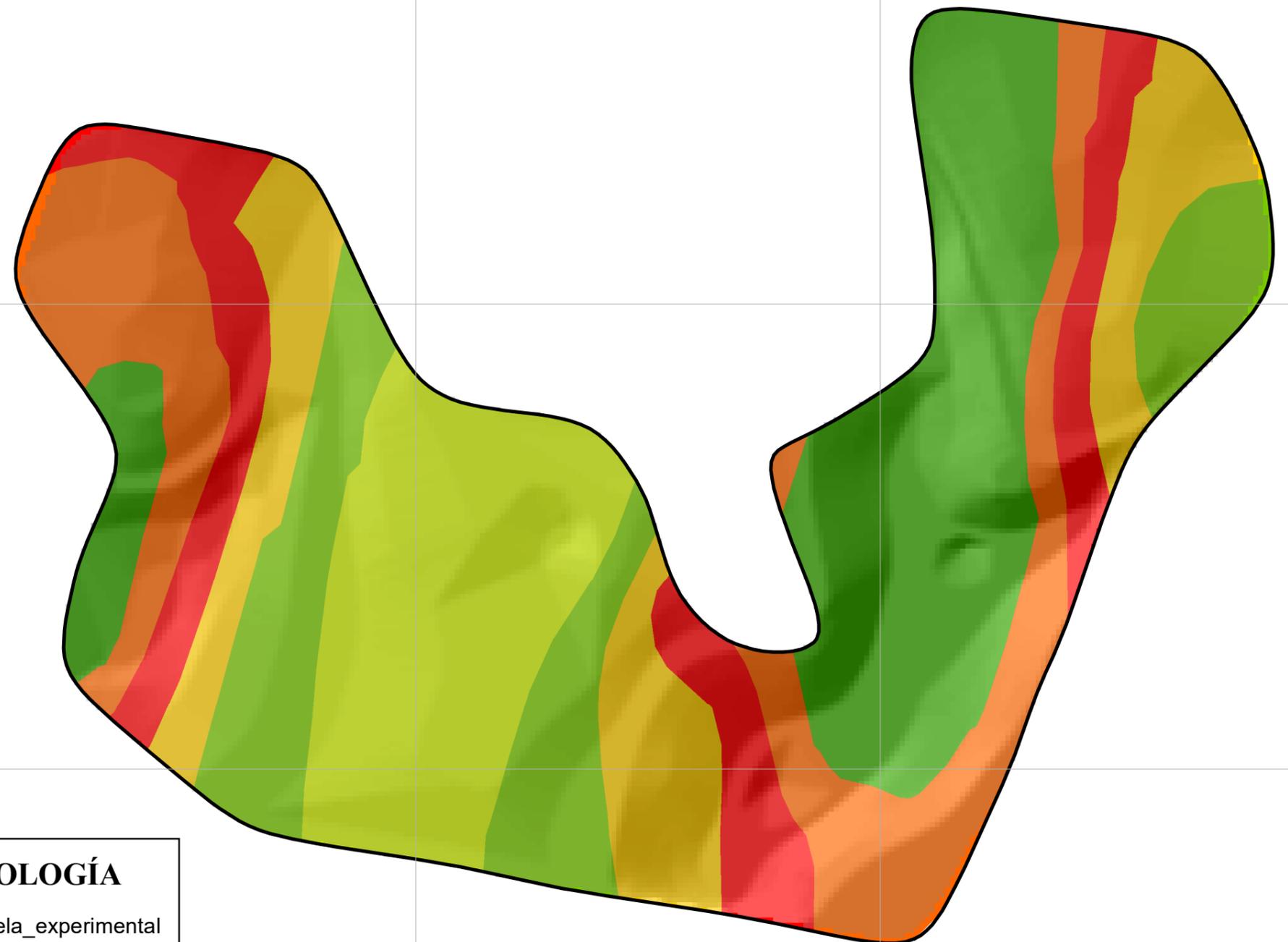
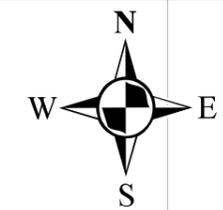
9087600

9088000

9087800

9087600

MAPA DE INTERPOLACIÓN DE NITROGENO CON KRIGING

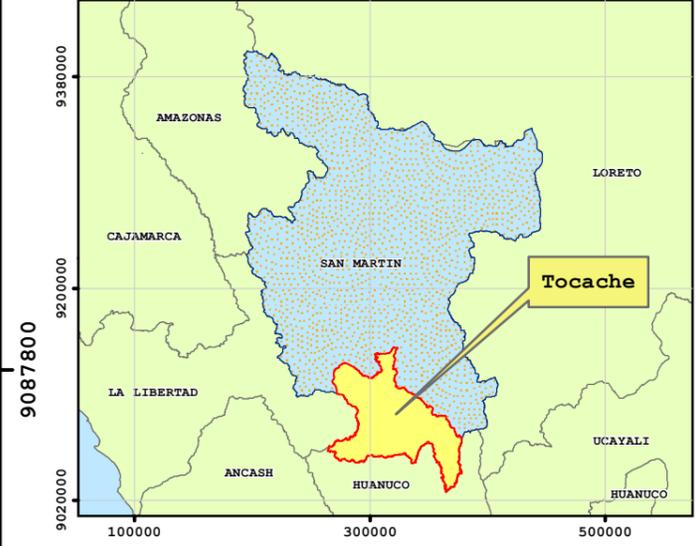


		UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA			
FACULTAD DE RECURSOS NATURALES RENOVABLES		ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA EN CONSERVACIÓN DE SUELOS Y AGUA			
Tesis:	DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LAS PROPIEDADES DEL SUELO EN UN ÁREA DE PRODUCCIÓN DE PALMA ACEITERA (<i>Elaeis guineensis</i> Jacq) DE NUEVA LIBERTAD, PROVINCIA DE TOCACHE, DEPARTAMENTO DE SAN MARTÍN				
Mapa:	UBICACIÓN DE LAS UNIDADES DE MUESTREO				
Datum:	Proyección UTM - 18S	Elaborado:			
	Datum horizontal: WGS-84	Bach. Amos, Aróstegui Encarnación			
	Datum vertical: Nivel medio del mar	Distrito:	Tocache		
Revisado:	Ing. Erle Bustamante Seaglioni	Provincia:	Tocache	L: 08	
Escala:	Indicada	Fecha:	Nov- 2021		

UBICACIÓN DEPARTAMENTAL



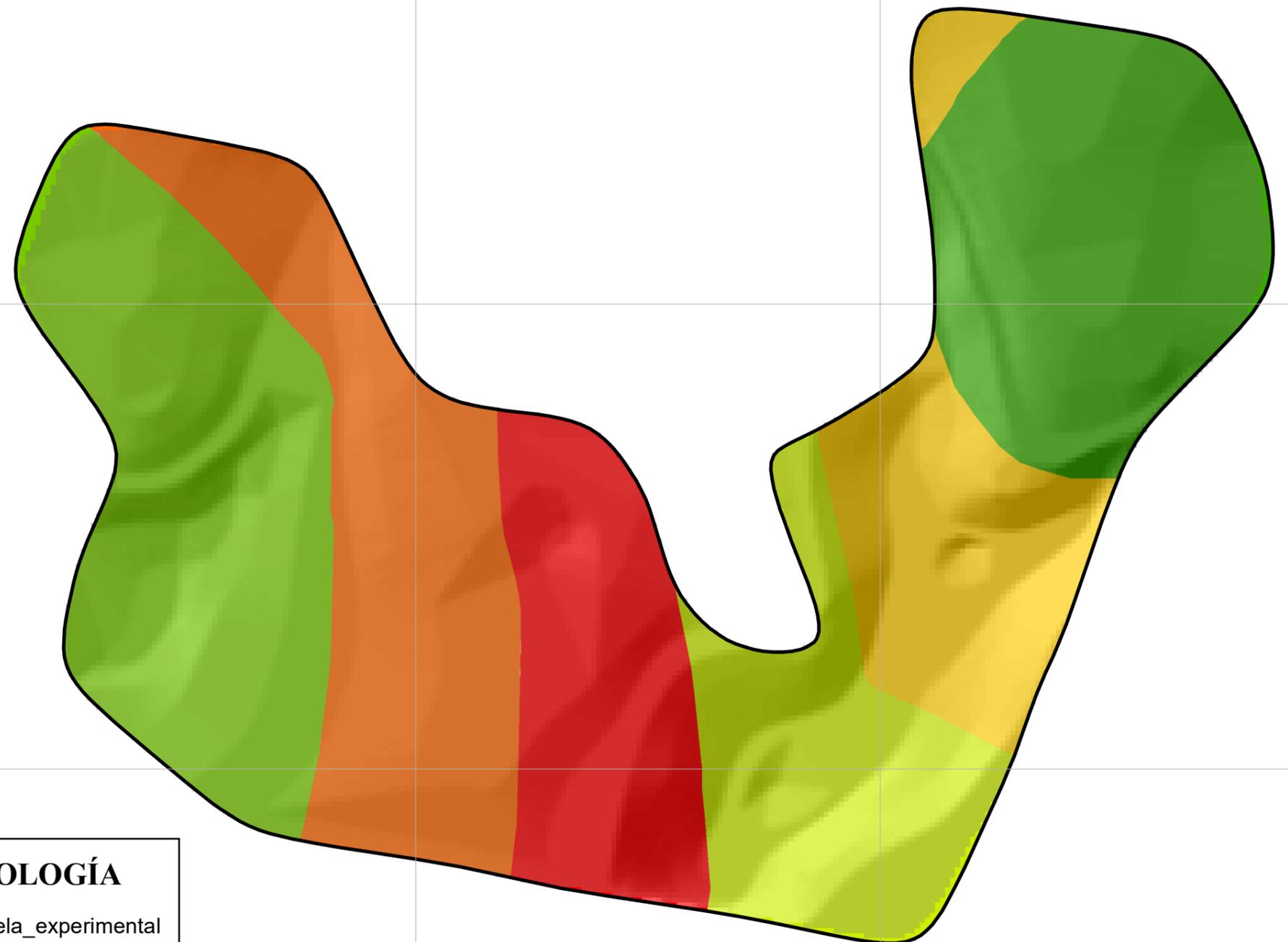
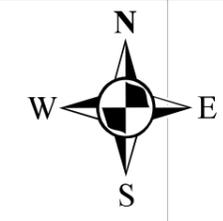
UBICACIÓN PROVINCIAL



UBICACIÓN DISTRITAL



MAPA DE INTERPOLACIÓN DE FÓSFORO CON KRIGING

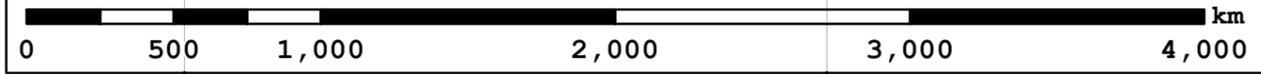


SIMBOLOGÍA

Parcela_experimental

P (ppm)

- 2.59 - 2.75
- 2.76 - 2.96
- 2.97 - 3.26
- 3.27 - 3.66
- 3.67 - 4.23
- 4.24 - 5.01

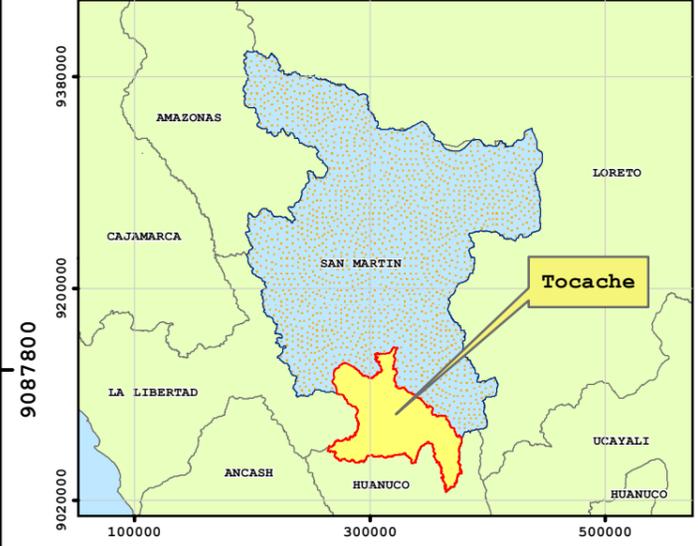


		UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA			
		FACULTAD DE RECURSOS NATURALES RENOVABLES			
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA EN CONSERVACIÓN DE SUELOS Y AGUA					
Tesis:	DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LAS PROPIEDADES DEL SUELO EN UN ÁREA DE PRODUCCIÓN DE PALMA ACEITERA (<i>Elaeis guineensis</i> Jacq) DE NUEVA LIBERTAD, PROVINCIA DE TOCACHE, DEPARTAMENTO DE SAN MARTÍN				
Mapa:	UBICACIÓN DE LAS UNIDADES DE MUESTREO				
Datum:	Proyección UTM - 18S		Elaborado:		
	Datum horizontal: WGS-84		Bach. Amos, Aróstegui Encarnación		
	Datum vertical: Nivel medio del mar		Distrito:	Tocache	
Revisado:	Ing. Erle Bustamante Seaglioni		Provincia:	Tocache	
Escala:	Indicada		Fecha:	Nov- 2021	
		Región:	San Martín		
					L: 09

UBICACIÓN DEPARTAMENTAL



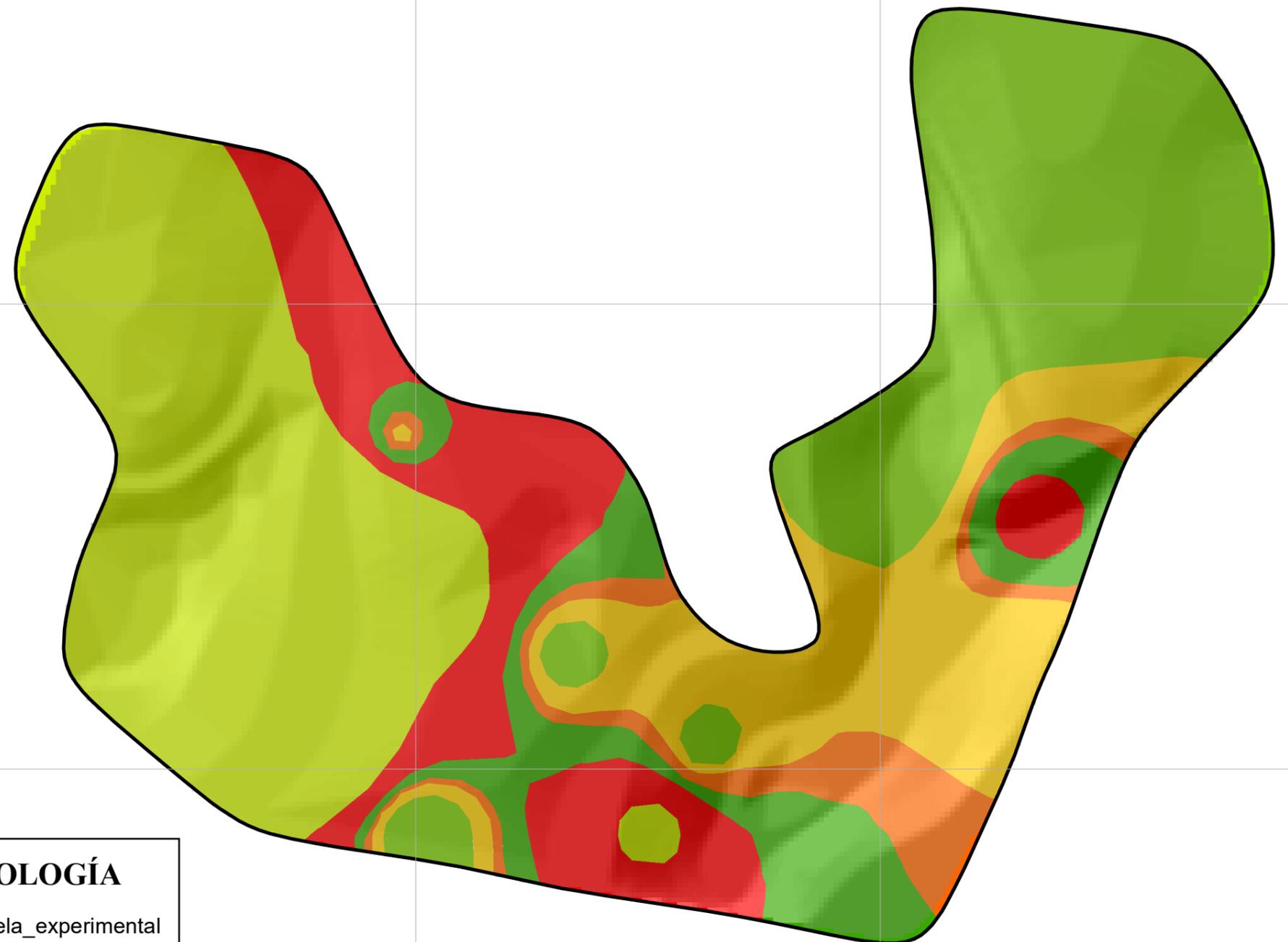
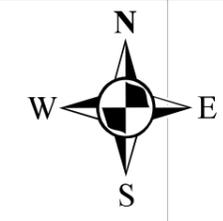
UBICACIÓN PROVINCIAL



UBICACIÓN DISTRITAL



MAPA DE INTERPOLACIÓN DE FÓSFORO CON IDW

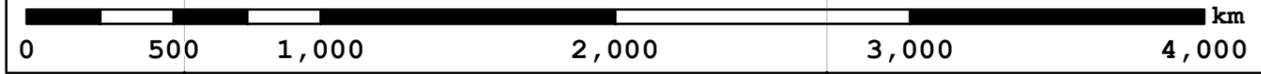


SIMBOLOGÍA

Parcela_experimental

P (ppm)

- 2 - 2.7
- 2.8 - 3
- 3.1 - 3.1
- 3.2 - 3.4
- 3.5 - 4.1
- 4.2 - 5.8

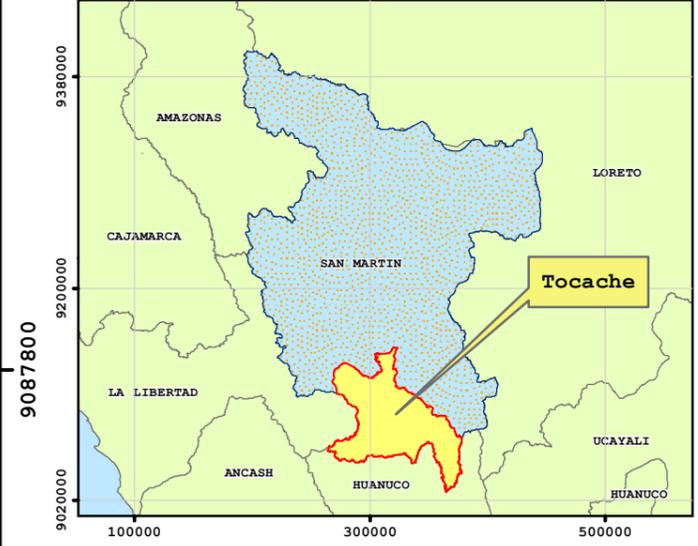


		UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA			
FACULTAD DE RECURSOS NATURALES RENOVABLES		ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA EN CONSERVACIÓN DE SUELOS Y AGUA			
Tesis:	DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LAS PROPIEDADES DEL SUELO EN UN ÁREA DE PRODUCCIÓN DE PALMA ACEITERA (<i>Elaeis guineensis</i> Jacq) DE NUEVA LIBERTAD, PROVINCIA DE TOCACHE, DEPARTAMENTO DE SAN MARTÍN				
Mapa:	UBICACIÓN DE LAS UNIDADES DE MUESTREO				
Datum:	Proyección UTM - 18S	Elaborado:			
	Datum horizontal: WGS-84	Bach. Amos, Aróstegui Encarnación			
	Datum vertical: Nivel medio del mar	Distrito:	Tocache	L: 10	
Revisado:	Ing. Erle Bustamante Scaglioni	Provincia:	Tocache		
Escala:	Indicada	Fecha:	Nov- 2021	Región:	San Martín

UBICACIÓN DEPARTAMENTAL



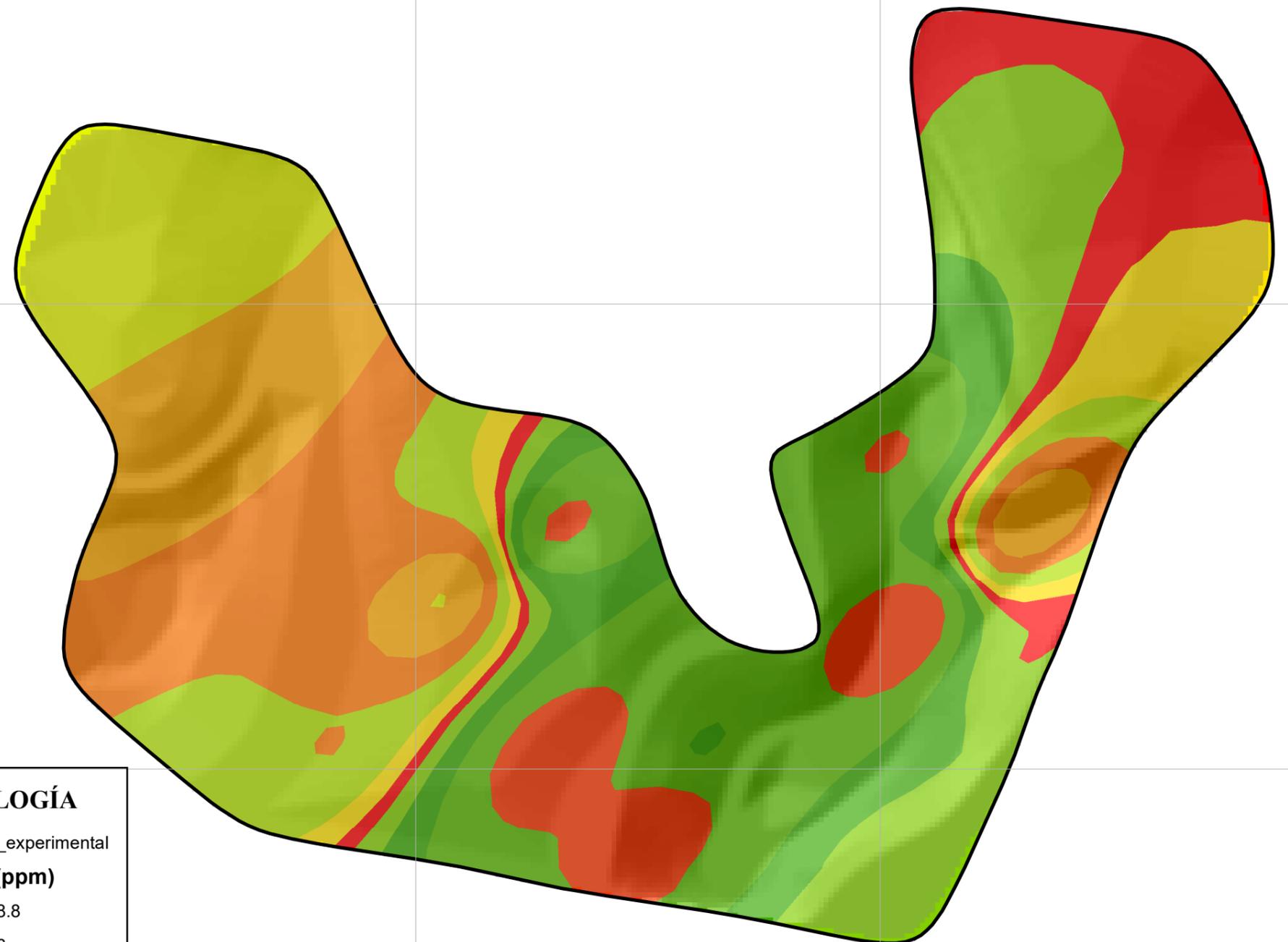
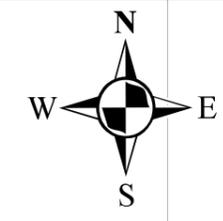
UBICACIÓN PROVINCIAL



UBICACIÓN DISTRITAL



MAPA DE INTERPOLACIÓN DE POTASIO CON IDW



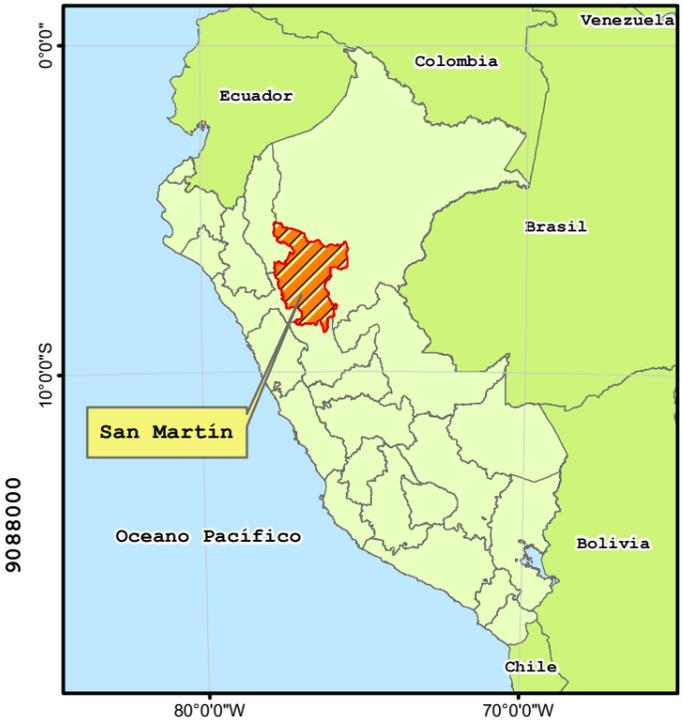
SIMBOLOGÍA

Parcela_experimental

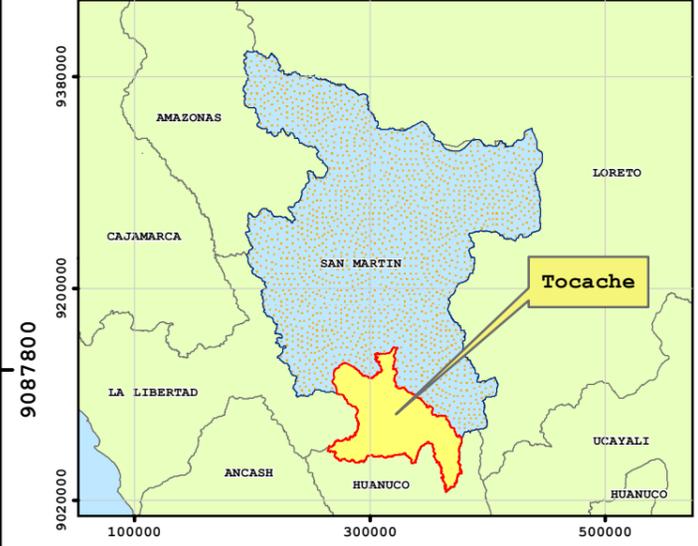
K (ppm)

- 37.7 - 48.8
- 48.9 - 56
- 56.1 - 60.8
- 60.9 - 63.9
- 64 - 66
- 66.1 - 69.1
- 69.2 - 73.9
- 74 - 81.1
- 81.2 - 92.2
- 92.3 - 109

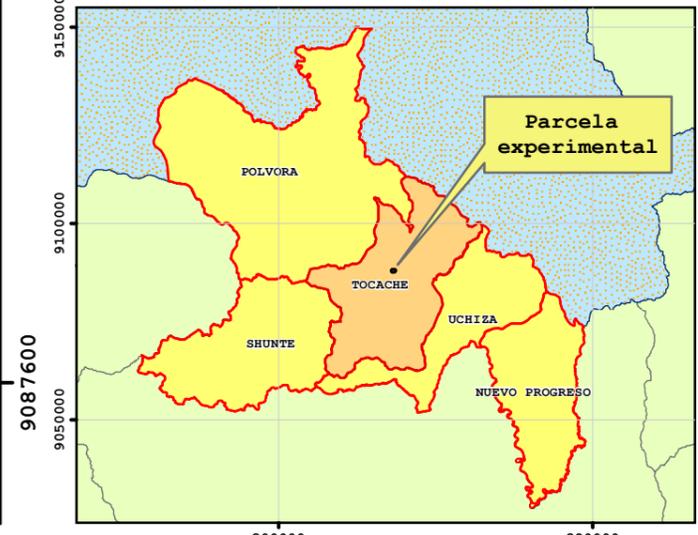
UBICACIÓN DEPARTAMENTAL



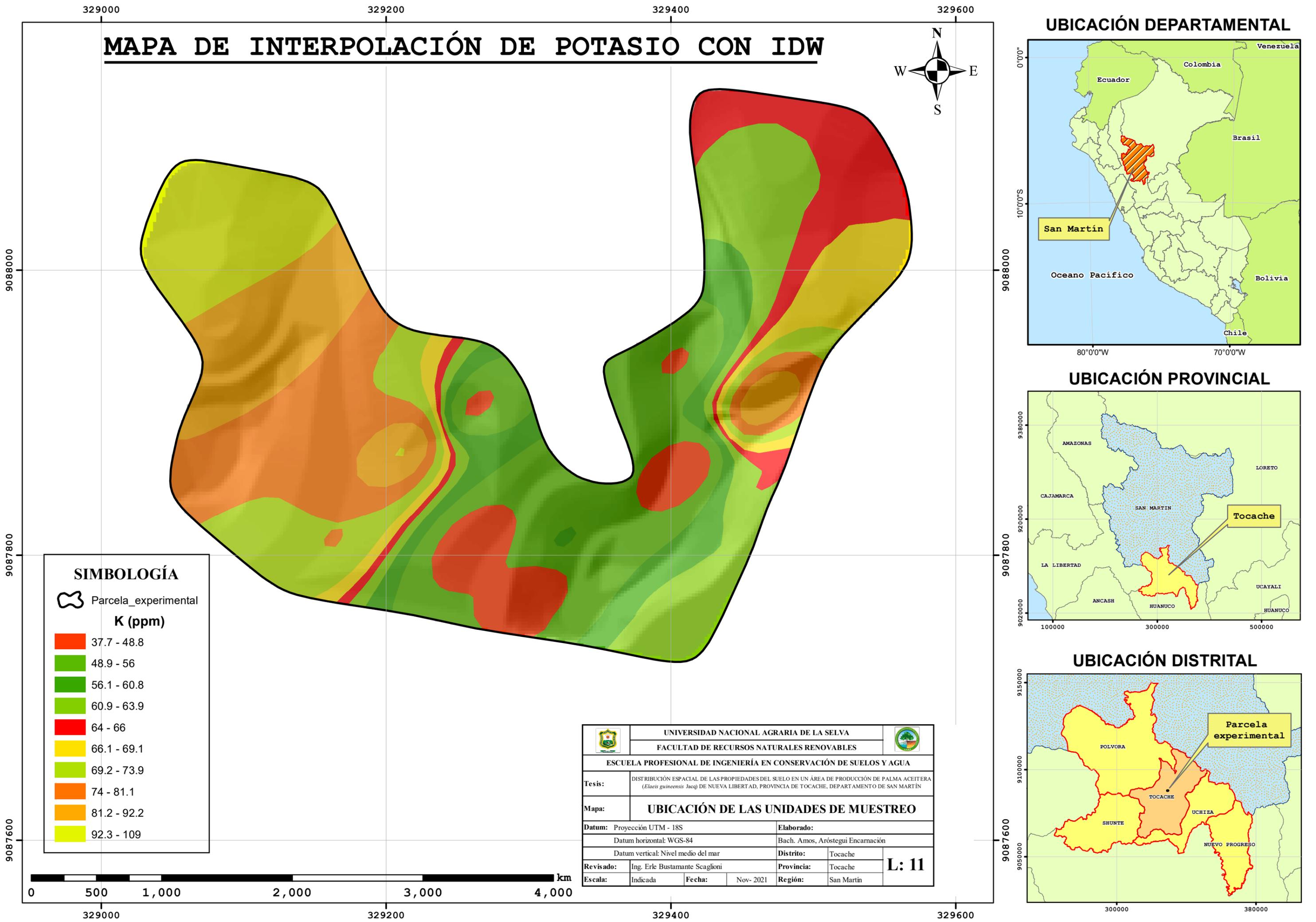
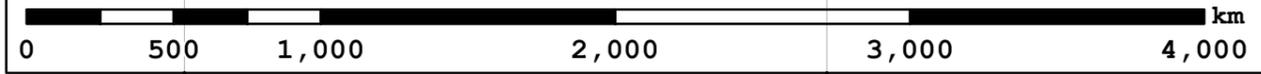
UBICACIÓN PROVINCIAL



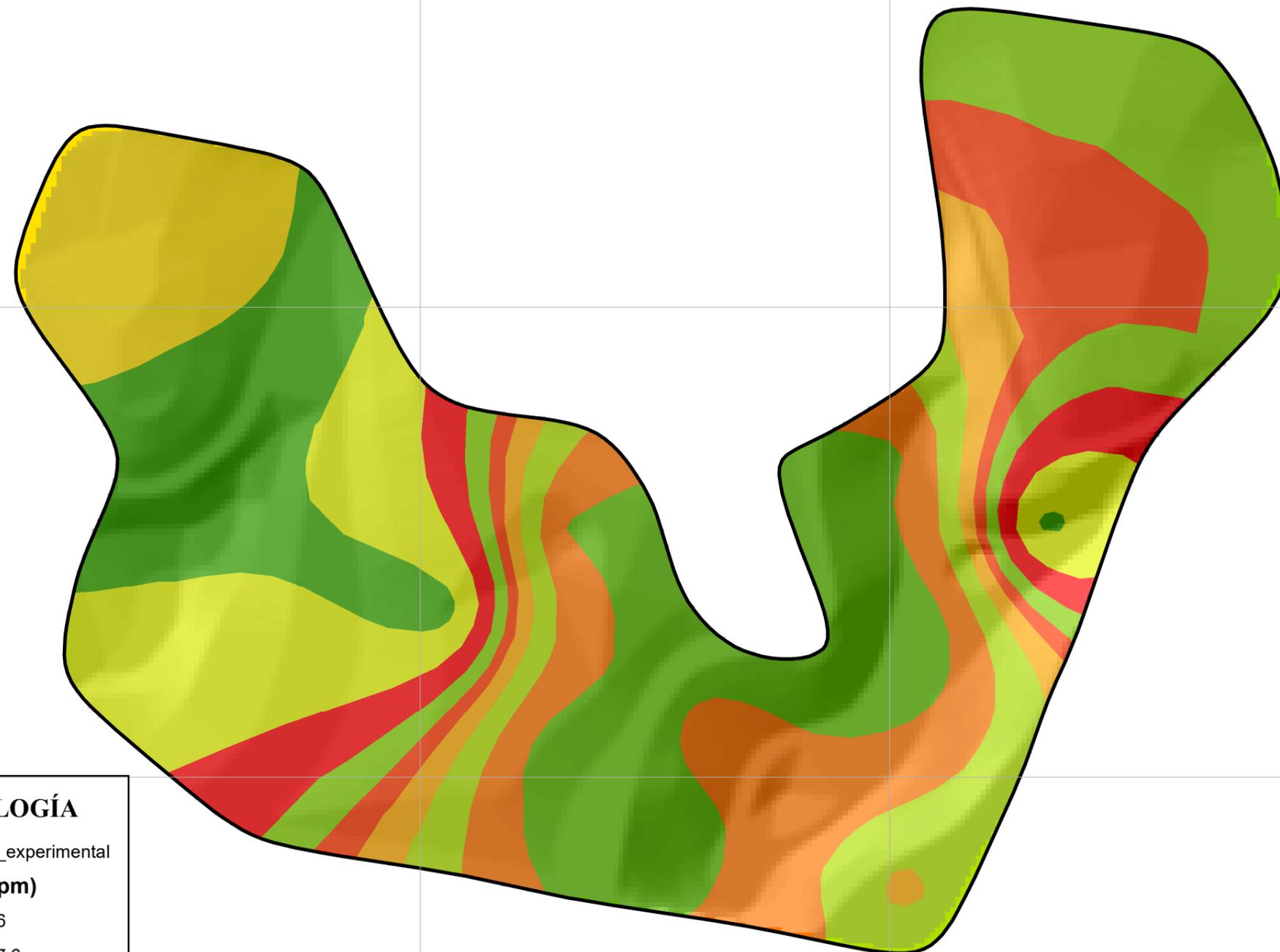
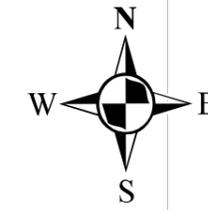
UBICACIÓN DISTRITAL



		UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA			
FACULTAD DE RECURSOS NATURALES RENOVABLES		ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA EN CONSERVACIÓN DE SUELOS Y AGUA			
Tesis:	DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LAS PROPIEDADES DEL SUELO EN UN ÁREA DE PRODUCCIÓN DE PALMA ACEITERA (<i>Elaeis guineensis</i> Jacq) DE NUEVA LIBERTAD, PROVINCIA DE TOCACHE, DEPARTAMENTO DE SAN MARTÍN				
Mapa:	UBICACIÓN DE LAS UNIDADES DE MUESTREO				
Datum:	Proyección UTM - 18S		Elaborado:		
	Datum horizontal: WGS-84		Bach. Amos, Aróstegui Encarnación		
	Datum vertical: Nivel medio del mar		Distrito:	Tocache	
Revisado:	Ing. Erle Bustamante Scaglioni		Provincia:	Tocache	
Escala:	Indicada	Fecha:	Nov- 2021	Región:	San Martín
					L: 11



MAPA DE INTERPOLACIÓN DE POTASIO CON KRIGING



SIMBOLOGÍA

Parcela_experimental

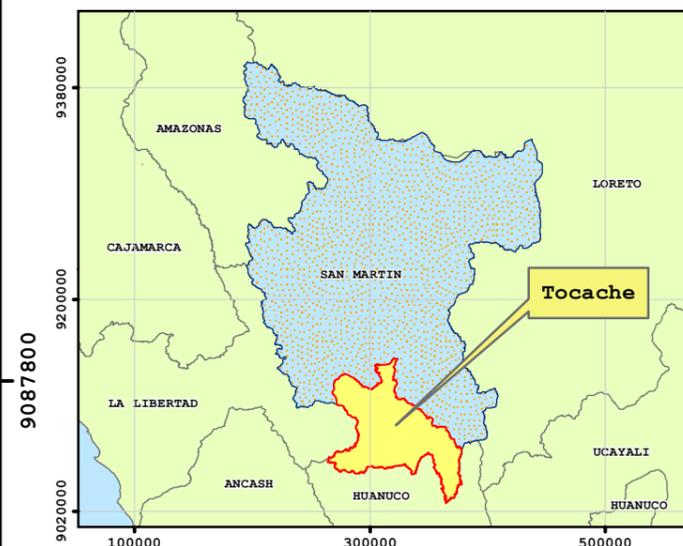
K (ppm)

- 41 - 50.6
- 50.7 - 57.6
- 57.7 - 62.6
- 62.7 - 66.3
- 66.4 - 69
- 69.1 - 72.6
- 72.7 - 77.7
- 77.8 - 84.7
- 84.8 - 94.3
- 94.4 - 107

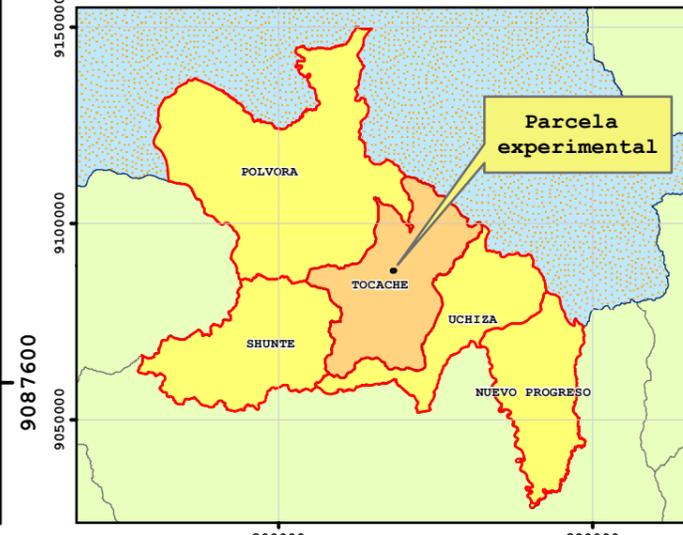
UBICACIÓN DEPARTAMENTAL



UBICACIÓN PROVINCIAL



UBICACIÓN DISTRITAL



		UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA			
FACULTAD DE RECURSOS NATURALES RENOVABLES					
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA EN CONSERVACIÓN DE SUELOS Y AGUA					
Tesis:	DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LAS PROPIEDADES DEL SUELO EN UN ÁREA DE PRODUCCIÓN DE PALMA ACEITERA (<i>Elaeis guineensis</i> Jacq) DE NUEVA LIBERTAD, PROVINCIA DE TOCACHE, DEPARTAMENTO DE SAN MARTÍN				
Mapa:	UBICACIÓN DE LAS UNIDADES DE MUESTREO				
Datum:	Proyección UTM - 18S		Elaborado:		
	Datum horizontal: WGS-84		Bach. Amos, Aróstegui Encarnación		
	Datum vertical: Nivel medio del mar		Distrito:	Tocache	
Revisado:	Ing. Erle Bustamante Scaglioni		Provincia:	Tocache	
Escala:	Indicada	Fecha:	Nov- 2021	Región:	San Martín
					L: 12

