

UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO

Colegio de Posgrados

**Implementación de un Sistema de Información Geográfica para el
manejo del recurso suelo para mejorar la productividad de los
principales cultivos en el Ecuador**

Darío Javier Boada Páramo

Richard Resl, Ph.D.(c), Director de Tesis

Tesis de grado presentada como requisito
para la obtención del título de Magister en Sistemas de Información Geográfica

Quito, febrero de 2015

Universidad San Francisco de Quito

Colegio de Posgrados

HOJA DE APROBACIÓN DE TESIS

**Implementación de un Sistema de Información Geográfica para el manejo del recurso
Suelo para mejorar la Productividad de los Principales Cultivos en el Ecuador**

Darío Javier Boada Páramo

Richard Resl, Ph.D.(c)

Director de Tesis

.....

Anton Eitzinger, MSc.

Miembro del Comité de Tesis

.....

Richard Resl, Ph.D.(c)

**Director de la Maestría en Sistemas
de Información Geográfica**

.....

Stella de la Torre, Ph.D.

**Decana del Colegio de Ciencias
Biológicas y Ambientales**

.....

Víctor Viteri Breedy, Ph.D.

Decano del Colegio de Posgrados

.....

Quito, febrero de 2015

© DERECHOS DE AUTOR

Por medio del presente documento certifico que he leído la Política de Propiedad Intelectual de la Universidad San Francisco de Quito y estoy de acuerdo con su contenido, por lo que los derechos de propiedad intelectual del presente trabajo de investigación quedan sujetos a lo dispuesto en la Política.

Asimismo, autorizo a la USFQ para que realice la digitalización y publicación de este trabajo de investigación en el repositorio virtual, de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Darío Javier Boada Páramo

C. I.:1715651681

Quito, febrero de 2015

DEDICATORIA

Dedico este trabajo a mi amada esposa Amparito que sin su apoyo y consideración no hubiera sido posible la dedicación y tiempo entregado a los estudios de maestría, de igual manera a mis hijos queridos Martín y Dominique, que son la fuente de mi inspiración y fortaleza para salir adelante.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco todo el apoyo brindado en los módulos de trabajo a la gente del programa UNIGIS y la Universidad San Francisco, de igual manera a la gente de la Consultora Agroprecisión Cía. Ltda. y el Ministerio de Agricultura Ganadería, Acuicultura y Pesca (MAGAP) por la colaboración en el desarrollo de este trabajo.

RESUMEN

Actualmente el Ecuador no cuenta con información georreferenciada de las características químicas y biológicas de los suelos y a una escala adecuada que permita a los diferentes organismos o personas en general, públicos y privados acceder a una fuente de información para la toma de decisiones en el requerimiento de fertilización de los cultivos, de igual manera no se tiene cuantificado ni especializado geográficamente los niveles de fertilidad en el territorio y la interrelación que esta tiene en los principales cultivos del país, lo cual no permite dimensionar a las entidades gubernamentales las cantidades de fertilizante que deberían utilizar los agricultores por área geográfica y que la mayoría de dichos fertilizantes son importados por el estado ecuatoriano, este estudio arrojará información que permitirá vislumbrar posibles fuentes de inversión para el estado como plantas procesadoras de urea (fertilizante nitrogenado).

El objetivo principal de este estudio es implementar un sistema de información geográfica para el manejo del recurso suelo con el fin de mejorar la productividad de los principales cultivos en el Ecuador.

Como objetivos específicos se plantearon establecer indicadores químicos, físicos y biológicos, mediante la interpretación e interpolación de resultados de 9.631 muestras de suelo tomados a nivel nacional, con el fin de espacializar las características químicas y físicas de los suelos y elaborar un mapa de fertilidad en plataforma SIG.

Para cumplir las metas planteadas se propone un análisis geoestadístico mediante los siguientes pasos: selección de las variables a utilizar, análisis exploratorio de los datos, selección del método de interpolación, análisis estructural y cálculo, prueba, comprobación y selección, salida final.

Toda la información de muestreos de suelos se exportó de formato MS excel a shapefile con la ubicación geográfica de las muestras de suelo donde se asignó coordenadas a la base de datos, posteriormente se generó fertigramas con interpolación mediante modelo Kriging para cada uno de los elementos químicos, físicos y orgánicos determinados en laboratorio. Como parte de los resultados finales se encuentra la generación del mapa de fertilidad con niveles ponderados de todas las variables que contiene el mapa, las mismas que permitieron evidenciar la capacidad y limitantes en los suelos, de igual manera se generaron 14 mapas de fertilidad por elemento químico, biológico y físico del suelo.

Finalmente para las recomendaciones de fertilización se estableció 13 cultivos de importancia económica del país y mediante arreglos matemáticos establecidos, se elaboró una hoja electrónica de cálculo formato MS Excel, la misma que permite calcular las recomendaciones para la fertilización de cultivos en cada una de las zonas del país, acogiéndose a las particularidades de clima, suelos y región geográfica.

ABSTRACT

Ecuador currently does not have georeferenced information on the chemical and biological characteristics of soils and adequate scale to the different organizations or people in general public and private access to a source of information for decision-making in the requirement crop fertilization, just as no one has quantified and geographically specialized fertility levels in the territory and the interrelationship that this has on the main crops of the country, which does not allow to government entities quantities of fertilizer that should farmers use by geographical area and that most of these fertilizers are imported by the Ecuadorian state, this study will shed glimpse information that will allow potential sources of investment for the state as processing plants urea (nitrogen fertilizer).

The main objective of this study is to implement a geographic information system for management of soil resources in order to improve the productivity of major crops in Ecuador.

Specific objectives were: to establish chemical, physical and biological indicators, through interpretation and interpolation results of 9,631 soil samples taken at national level, in order to spatialize the chemical and physical characteristics of soils and map fertility GIS platform.

To meet the goals outlined a geostatistical analysis is proposed using the following steps: selection of variables to be used, exploratory data analysis, interpolation method selection, structural analysis and calculation, testing, testing and selection, final exit.

All information on soil sampling was exported from MS excel format shape file with the geographic location of the soil samples which coordinates the database is assigned, subsequently generated maps fertility interpolation by model Kriging for each chemical elements determined in laboratory.

The main results is the map generation fertility weighted variables containing all map levels, which allowed them to demonstrate the capability and limitations in soils, likewise 14 fertility maps were generated by chemical, biological element and physical soil.

Finally for fertilizer recommendations 13 economically important crops of the country was established and by mathematical arrange an electronic spreadsheet format MS Excel was developed, the same that calculates the recommendations for fertilization of crops in each of the areas of the country , according to the peculiarities of climate, soil and geographical region.

TABLA DE CONTENIDO

Contenido	Páginas
RESUMEN.....	7
ABSTRACT	8
CAPÍTULO I.....	14
1. INTRODUCCIÓN.....	14
1.1. Antecedentes	15
1.2. El Problema.....	16
1.3. Objetivos.....	17
Objetivo General.....	17
Objetivos Específicos	18
Hipótesis	18
CAPÍTULO II.....	18
2. REVISIÓN DE LITERATURA	19
2.1. Aspectos Biofísicos (Diagnostico Nutricional) de los suelos.....	19
Potencial Hidrógeno (pH).....	19
Conductividad Eléctrica (C.E).....	20
Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC)	20
Materia Orgánica (MO).....	21
Nitrógeno (N)	22
Fósforo (P).....	23
Potasio (K).....	24
Calcio (Ca).....	25
Magnesio (Mg)	26
Azufre (S)	27
Micronutrientes.....	28
2.2. Factores que afectan a la disponibilidad de micronutrientes	29
2.3. Interpolación y modelación espacial de variables biofísicas	30
Conceptos	30
Variables edafológicas.....	38
2.4. Digital Soil Mapping	39

Los diferentes tipos de modelos de DSM.....	39
CAPÍTULO III	42
3. METODOLOGÍA.....	42
3.1 Ubicación y Límites del Proyecto	42
3.1. Aspectos Generales	43
Uso de la metodología adecuada	43
3.2. Flujograma de Procedimiento	46
3.3. Georeferenciación de la información de muestreos de suelos	47
3.4. Transformación de formato MSEXCEL a shape file.....	47
3.5. Ubicación geográfica de las muestras de suelo.....	47
3.6. Asignación de coordenadas a la base de datos.....	50
3.7. Fertigramas con Interpolación modelo Kriging para cada uno de los elementos químicos determinados en laboratorio.....	50
3.8. Análisis Exploratorio de los dato.....	50
Información Básica.....	50
3.9. Interpretación y Mapeo de los Indicadores Químicos y Biológicos	61
Depuración de los análisis de suelos	61
Determinación de Rangos.....	61
3.10. Mapa de fertilidad	63
CAPÍTULO IV	69
4. RESULTADOS	69
5. CONCLUSIONES.....	89
6. RECOMENDACIONES	90
7. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.....	91

Lista de Tablas

Cuadro 1. Categorías en porcentaje de Materia Orgánica y ponderación.	22
Cuadro 2. Doce Clases texturales de suelos.	38
Cuadro 3. Tabla de atributos con la información edáfica.....	60
Cuadro 4. Rangos para materia orgánica identificando Sierra y Costa.	61
Cuadro 5. Rangos para Macronutrientes y Materia orgánica.	61
Cuadro 6. Rangos para Mesonutrientes.....	62
Cuadro 7. Rangos para Micronutrientes.....	62
Cuadro 8. Ejemplo de interpretación para los elementos.	62
Cuadro 9. Rangos para potencial hidrógeno (pH).....	63
Cuadro 10. Rangos para Conductividad Eléctrica (CE).	63
Cuadro 11. Ponderación por variable y valor total para calificación de fertilidad.	64
Cuadro 12. Valores ponderados asignados para cada nutriente calificado por rango de fertilidad.	65
Cuadro 13. Valores ponderados asignados para las variables Textura, pH, y CE para determinar el nivel de fertilidad.	65
Cuadro 14. Ejemplo de ponderación en la tabla de atributos para Nitrógeno disponible en el suelo.....	66
Cuadro 15. Ejemplo de sumatoria de algunos valores ponderados y asignación rangos de fertilidad.	66
Cuadro 16. Ponderación en la tabla de atributos para cada una de las variables.....	67
Cuadro 17. Rangos y nivel de fertilidad de la cobertura de fertilidad nacional.	68
Cuadro 18. Porcentaje por Niveles de fertilidad para el Territorio continental.	70
Cuadro 19. Requerimientos nutricionales para los principales cultivos de la zona de intervención de las ERA's.	85

Lista de Figuras

Figura 1. Modelo de variograma.	33
Figura 2. Construcción del variograma desde datos muestrales.....	34
Figura 3. Modelo esférico.....	34
Figura 4. Modelo exponencial.	35
Figura 5. Modelo Gaussiano.....	35
Figura 6. Modelo Lineal.	36
Figura 7. Dirección de la Anisotropía.	36
Figura 8. Tipos de modelos DMS.....	40
Figura 9. República del Ecuador	42
Figura 10. Flujograma de procedimientos	46
Figura 11. Metodología de generación centroides de todas las parroquias del país.....	48
Figura 12. Trabajo en el Software ArcGis para la ubicación de los puntos cerca de cada parroquia o recinto mencionados en la información ERAS.	49
Figura 13. Histograma en la tendencia original de los datos.....	50
Figura 14. Histograma con transformación logarítmica para ajuste de datos.	51
Figura 15. Valor estándar normal de la muestra para cada variable.....	51
Figura 16. Valor estándar normal de la muestra para cada variable.....	52
Figura 17. Kriging ordinario.....	52
Figura 18. Transformación de datos y orden de la tendencia.	53
Figura 19. Tendencia de la distribución	53
Figura 20. Semivariograma.	54
Figura 21. Predicción.....	54
Figura 22. Error de modelo de interpolación.....	55
Figura 23. Cercanía de los puntos a la tendencia y modelación.....	55
Figura 24. Modelación aplicando un modelo de suavidad de 0,5.	56
Figura 25. Modelo de interpolación para cada una de las variables, Ejemplo para Nitrógeno.....	57
Figura 26. Transformación del modelo de interpolación a vector.....	58
Figura 27. Modelo de Fertograma para la variable Nitrógeno.	59
Figura 28. Mapa de fertilidad se los suelos del Ecuador	69
Figura 29. Mapa de Clases texturales	71
Figura 30. Mapa de Materia Orgánica.....	72

Figura 31. Mapa de pH.....	73
Figura 32. Mapa de pH.....	74
Figura 33. Mapa de Potasio	75
Figura 34. Mapa de Azufre.....	76
Figura 35. Mapa de Manganeseo	77
Figura 36. Mapa de Calcio	78
Figura 37. Mapa de Cobre	79
Figura 38. Mapa de Hierro	80
Figura 39. Mapa de Magnesio	81
Figura 40. Mapa de Zinc.....	82
Figura 41. Mapa de Boro.....	83
Figura 42. Mapa de Conductividad Eléctrica	84
Figura 43. Tabla de Excel dinámica con recomendación de fertilización de cultivos. ...	86

Lista de Gráficos

Gráfico 1. Porcentaje por Niveles de fertilidad para el Territorio Continental.	70
--	----

CAPÍTULO I

1. INTRODUCCIÓN

El Ecuador se encuentra en una etapa de cambios, y en este contexto, el sector agropecuario enfrenta nuevos retos, enrolados en el marco de la modernización y de la globalización, que se deben enfrentar para continuar con un desarrollo dinámico y sostenible, éste debe asumir transformaciones económicas, comerciales, institucionales y sociales.

Existe además en el país, un agresivo deterioro del recurso suelo, por su uso inadecuado, situación que se acentúa cada vez más. Su origen se debe a la falta de capacitación de los usuarios y al crecimiento demográfico, que presiona el uso intensivo de los recursos (suelo, agua, vegetación). CLIRSEN, 1990.

El Programa Nacional de Innovación Tecnológica Participativa y Productividad Agrícola, a través de la metodología de las Escuelas de la Revolución Agraria (ERA), con la finalidad de formar nuevos ciudadanos rurales, quienes con conocimientos críticos de la situación nacional, conozcan sus derechos u obligaciones, e incidan en las decisiones políticas para plantear y resolver los principales problemas del sector agropecuario.

En el marco de la ejecución del mencionado proyecto se han realizado alrededor de 9.631 muestreos de suelos y sus respectivos análisis en laboratorio, muestras levantadas en las parcelas de aprendizajes y fincas de los productores participantes en las ERA desde el año 2010 y 2011, esto a manera de práctica de aprendizaje contemplado en el currículo de capacitación. Estos análisis de suelos fueron realizados en diferentes laboratorios y sus resultados forman parte de una base de datos, información que requiere ser procesada según el sitio de muestreo, a fin de contar con la distribución del contenido de nutrientes en el suelo, y de esta manera interpretar la fertilidad de los suelos y proporcionar recomendaciones para lograr incrementos en la producción y generar una mapa actualizado de la fertilidad del suelo.

1.1. Antecedentes

Este tipo de estudios son muy relevantes en el Ecuador, ya que el país posee aproximadamente un 60% de su territorio para vocación agropecuaria, de los cuales un 46 % actualmente dedicado a la explotación y un 90% del territorio corresponden al sector rural. Igualmente debido a la variabilidad química y estructura física de los suelos en el Ecuador que altera el comportamiento en productividad de los cultivos, esto consecuencia también a la gran variabilidad fisiográfica, geología y geomorfología del territorio. Esto ha diversificado el potencial de uso agrícola, pecuario y forestal en el país, por tal motivo es importante conocer y analizar tal diversidad, para optimizar el manejo y lograr el adecuado aprovechamiento. (García, F, 2007).

El Gobierno Nacional a través de la constitución de la república, y el plan de desarrollo nacional 2009-2013 publicado por SENPLADES (Secretaría Nacional de Planificación y Desarrollo) determinan como eje fundamental el desarrollo equitativo de los territorios y el Buen vivir de los ecuatorianos, y se marca el inicio de una planificación a gran escala con el fin de ordenar el territorio y planificar a corto, mediano y largo plazo. Por tal motivo todas las instituciones involucradas en este proceso como Ministerio de Agricultura, Ganadería, Pesca y Acuicultura (MAGAP), Gobiernos autónomos descentralizados (Concejos Provinciales, Municipios y parroquias), Ministerio del Ambiente, ONG's y demás actores del territorio serán los beneficiados con este proyecto que pretende aportar con herramientas e información clave para la toma de decisiones.

Con el fin de establecer indicadores químicos, físicos y biológicos, se utilizará la interpretación de resultados de más de 9. 000 muestras de suelo que han sido procesadas en campo el último año por las ERAS-MAGAP a nivel nacional.

Para la elaboración del modelo de restitución de información de suelos y de fertilidad se trabajará en plataforma SIG ArcGis 10.0, se utilizará información secundaria como: PRONAREG-ORSTOM Mapa de suelos escala 1: 200 000 a nivel nacional 1985; Proyecto IICA-MAG-CLIRSEN Mapas de suelos 1:250 000 a nivel nacional año 2002, actualizaciones SIGAGRO a escala 1: 50000 año 2004, Proyecto Fertigrama de la FAO con un número de muestra de suelos e interpretación de 9000 a nivel nacional e interpretación, e información de nuevas muestras de suelos, Memoria Técnica de Mapa de capacidad-fertilidad de los suelos del Ecuador escala 1 000 000, Guía Técnica de Cultivos

publicado por INIAP (Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias), Infraestructura Ecuatoriana de Datos Geoespaciales (IEDG).

Con estos insumos se pretende elaborar un modelo actualizado de fertilidad de los suelos enfocado a los principales cultivos del país a escala 1 : 100 000, con el fin de obtener tres niveles de fertilidad (alto, medio y bajo) y bajo estas condiciones crear un algoritmo (según literatura INIAP) que nos permita recomendar macro nutrientes y micronutrientes (fertilización) por nivel de fertilidad a los 10 a 12 principales cultivos considerados como prioritarios en el territorio ecuatoriano, esta información se tabulará en bases de datos y se integrará al mapa de fertilidad del Ecuador.

1.2. El Problema

Actualmente el Ecuador no cuenta con información georreferenciada de las características químicas y biológicas de los suelos y a una escala adecuada que permita a los diferentes organismos o personas en general, acceder a una fuente de información para la toma de decisiones en el requerimiento de fertilización de los cultivos, de igual manera no se tiene cuantificado ni espacializado geográficamente los niveles de fertilidad en el territorio y la interrelación que esta tiene en los principales cultivos del país, lo cual no permite dimensionar a las entidades gubernamentales las cantidades de fertilizante que deberían utilizar los agricultores por área geográfica y que la mayoría de dichos fertilizantes son importados por el estado ecuatoriano, este estudio arrojará información que permitirá vislumbrar posibles fuentes de inversión para el estado como Plantas procesadoras de Urea (fertilizante nitrogenado).

Anteriormente en 1997 Mejía, L. publica un mapa de fertilidad en base a información de clasificación de los suelos generado en el programa PRONAREG-ORSTOM Mapa de suelos escala 1: 200 000 a nivel nacional, con una escala de información 1: 1000 000, sin embargo no se ha podido determinar de manera fehaciente con muestreos de campo y resultados de laboratorio que permitan tener una mejor concepción de las características químicas y biológicas de los suelos. Actualmente a través de los programas del Estado Ecuatoriano para impulsar el desarrollo en el área agrícola se cuenta con una base de información de más de 9000 muestras de suelos tomadas en campo con sus resultados y análisis químico biológico de laboratorio tomadas a nivel nacional lo que nos permitirán entender de mejor manera el comportamiento de la fertilidad de los suelos en el Ecuador

apoyados con herramientas como son los sistemas de información geográfica los cuales nos permitirán generar modelos estadísticos con el fin de especializar la información de la manera más confiable y representarlos a través de mapas temáticos de todo el país.

Preguntas de Investigación

¿Cómo y hasta qué punto la implementación de un sistema de información geográfica para el manejo del recurso suelo puede mejorar la productividad de los principales cultivos en el Ecuador?

¿Cómo y hasta qué punto los indicadores químicos, físicos y biológicos georreferenciados e interpolados de los resultados de 9.631 muestras de suelo servirán para la toma de decisiones en cuanto al manejo correcto del suelo, cosecha y mejoramiento de los niveles de fertilidad de los suelos?

¿Cómo y hasta qué punto realizar un análisis geoestadístico en SIG mediante la interpolación de las muestras de suelos a nivel nacional permitirá la espacialización de las características químicas y físicas de los suelos?

¿Cómo y hasta qué punto elaborar un mapa de fertilidad de los suelos permitirá mejorar la productividad de los principales cultivos del Ecuador?

¿Cómo y hasta qué punto proporcionar una tabla dinámica de recomendación de fertilización de los principales cultivos del Ecuador permitirá mejorar la productividad de los mismos?

1.3. Objetivos

Objetivo General

Con este estudio se pretende implementar un sistema de información geográfica para el manejo del recurso suelo, con el fin de mejorar la productividad de los principales cultivos en las zonas de intervención de las ERA's del Ministerio de Agricultura del Ecuador (MAGAP).

Objetivos Específicos

- Establecer indicadores químicos, físicos y biológicos, mediante la interpretación de resultados de 9.631 muestras de suelo que han sido procesadas en campo desde el año 2010 y 2011 por parte de las ERAS, los mismos que servirán para la toma de decisiones en cuanto al manejo correcto del suelo, cosecha y mejoramiento de los niveles de fertilidad de los suelos.
- Realizar un análisis geoestadístico en SIG que permita la interpolación de los muestreos de suelos a nivel nacional con el fin de espacializar las características químicas y físicas de los suelos.
- Elaborar un mapa de fertilidad en plataforma SIG, utilizando la información ponderada y espacializada de las características químicas y físicas de los suelos.
- Proporcionar una tabla dinámica de los principales cultivos del Ecuador y su recomendación de fertilización.

Hipótesis

Ha = El ministerio de agricultura no posee una herramienta SIG implementada de soporte en la toma de decisiones para el manejo de la fertilidad de los suelos y mejoramiento de la productividad de los principales cultivos del Ecuador, por ende no se tiene una concepción territorial de la distribución espacial de las características químicas y físicas de los suelos y sus niveles de fertilidad.

Hb = La implementación de un sistema de información geográfica de soporte a la toma de decisiones en el manejo de la fertilidad de los suelos y cultivos contribuirá al mejoramiento de la productividad de los principales cultivos del Ecuador.

CAPÍTULO II

2. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. Aspectos Biofísicos (Diagnostico Nutricional) de los suelos

Potencial Hidrógeno (pH)

El crecimiento de las plantas puede verse afectado por el pH del suelo por varias formas como las condiciones adversas para el crecimiento que ocurren a los dos extremos de la escala de pH. Algunos suelos pueden ser muy ácidos (bajo pH), para un óptimo desarrollo, mientras que otros pueden ser muy básicos (alto pH). El uso de enmiendas para corregir las condiciones extremas del pH del suelo es esencial para alcanzar la máxima producción (Padilla, W. 2007)

Químicamente hablando una sustancia es ácida cuando entrega neutrones (H^+) y es básica cuando gana neutrones. El pH es un índice que indica el grado de acidez o alcalinidad de un extracto acuoso del suelo. Se trata de un índice, es decir es un indicativo de las condiciones generales de fertilidad del suelo. (Padilla, W. 2007).

Esto significa que un pH bajo o un pH alto en el suelo ocasionaría deficiencias o excesos nutricionales de varios elementos, lo cual sería considerado como la enfermedad (Tomé, 1997 y Navarro, 2000).

Una solución nutritiva hidropónica puede tener un pH de 4 o de 8,5 y las plantas bien pueden seguir absorbiendo los nutrientes si estos son mantenidos en solución mediante artificios químicos. Pero en el suelo los valores de pH menores de 4,5 o arriba de 7,5 ya restringen bastante el crecimiento, (Padilla, W. 2007), debido a que estos valores indican la existencia de varias condiciones desfavorables en las plantas como deficiencias de Ca y Mg, altos contenidos de aluminio, alta fijación de fósforo a pH bajo y deficiencia de micronutrientes o un exceso de sales a pH alto.

Estas observaciones son muy oportunas debido a que muchos productores y técnicos ponen demasiada atención a los valores de pH en forma aislada, estando otros índices de fertilidad con valores óptimos o ideales.

En algunos casos, por ejemplo, un encalamiento o aplicación de azufre al terreno antes de tomar la muestra puede inducir al incremento o reducción de las lecturas de pH, lo que no significa que el suelo esté con exceso de acidez o alcalinidad, pudiéndose percibir que esto ocurre o no si los demás parámetros del análisis están adecuados. (INIAP, 2006).

Conductividad Eléctrica (C.E)

La salinidad del suelo se refiere al contenido de sales solubles en el mismo. Las sales son comúnmente mezclas de cloruros, sulfatos, bicarbonatos, nitratos y boratos de sodio, magnesio y calcio. Cualquiera sea el caso: contenido total de sales, sales individuales o combinación de las mismas en el suelo, ellas causan un retraso en el crecimiento de las plantas, daño en los tejidos y decrecimiento en rendimiento.

La meteorización de las rocas a través del tiempo es el origen de las sales solubles del suelo. Donde la lluvia es copiosa, casi todas las sales han sido lavadas del suelo, en cambio en regiones áridas los niveles de sales son altos. Sin embargo no todos los suelos de las regiones áridas son salinos. (Padilla. W, 2002).

Cuando mayor es la concentración de sales en una solución del suelo, mayor es la corriente eléctrica que puede ser transmitida a través de ella. Por eso la conductividad eléctrica del extracto de saturación-CE se utiliza como indicadora de la salinidad del suelo. (Padilla. W, 2002).

Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC)

Las partículas que tienen cargas opuestas se atraen entre ellas, mientras que partículas con la misma carga se repelen. Debido a la química de las partículas de suelo, especialmente de las arcillas y de la materia orgánica, sitios de cargas negativas se desarrollan sobre sus superficies. La capacidad de intercambio catiónico se refiere a la habilidad que tiene el suelo de atraer y retener cationes sobre su superficie e intercambiarlos con otros en el medio ambiente circundante. Los cationes retenidos en la superficie se denominan iones adsorbidos. Mientras más grande es la CIC, más grande es la capacidad de retención de cationes y debido a que la mayoría de los elementos esenciales para el crecimiento de las plantas son cationes, los suelos con altos valores de CIC, sirven como un buen reservorio para estos nutrientes. (Padilla. W, 2002).

La CIC es la cantidad total de cationes que el suelo puede intercambiar por unidad de peso, es una medida de la capacidad del suelo para retener y liberar elementos tales como K, Ca, Mg y Na, Suelos con alta arcilla o materia orgánica, tienden a tener una alta CIC, la que se interpreta como la Fertilidad del suelo (Fassbender. H, 1975).

Materia Orgánica (MO)

La materia orgánica está representada en el suelo por los residuos de plantas y animales en varios estados de descomposición, es decir que el contenido de materia orgánica varía según la tasa de mineralización, por existir relación inversa entre altitud y temperatura. Se ha encontrado correlación positiva entre el contenido de materia orgánica y la altura sobre el nivel del mar, el promedio de materia orgánica total aumenta unas dos a tres veces por cada 10°C de disminución de temperatura (Potash & Phosphate Institute, 1997).

Los residuos vegetales, cadáveres de microorganismos vegetales especialmente bacterias y hongos son considerados el material originario principal de la materia orgánica, las deyecciones y cadáveres de animales mayores son considerados fuentes secundarias de materia orgánica (Navarro, 2003).

Mohr estableció la temperatura de 25,4°C como límite de equilibrio de la descomposición y acumulación de la materia orgánica. Es decir, sobre esta temperatura la descomposición será mayor que la acumulación y bajo esta temperatura la acumulación será mayor que la descomposición de la materia orgánica (Luzuriaga, 2001). Con este antecedente se determinó a partir de los 600 metros la temperatura promedio diaria es menor que 25°C, por lo tanto la mineralización es menor y los productos de la descomposición de la materia orgánica son menos disponibles y se acumulan más sobre esta cota, así que se asumió que los valores que maneja INIAP como “Costa” se encuentran bajo la cota de los 600 metros.

Cuadro 1. Categorías en porcentaje de Materia Orgánica y ponderación.

Nivel	Interpretación (%)	Etiqueta
1	< 3.0	Bajo (Sierra)
2	3.0 – 5.0	Medio (Sierra)
3	> a 5.0	Alto (Sierra)
1	< 1 .0	Bajo (Costa)
2	1.0 – 2.0	Medio (Costa)
3	> a 2.0	Alto (Costa)

Nitrógeno (N)

El nitrógeno del suelo procedente de la fijación atmosférica y de los residuos orgánicos es alto en comparación con el de las rocas, a pesar de esto es una parte insignificante del total. En agricultura la parte más importante de N usado por las plantas es a veces el que se provee en forma de fertilizante. Sin exagerar, el crecimiento de las plantas está a menudo afectado por la deficiencia de N que de otro nutrimento. Una razón para esto es que las plantas requieren grandes cantidades de nitrógeno. Se ha calculado que las plantas contienen más átomos de N que de ningún otro elemento derivado del suelo, a excepción del hidrógeno. Es así como el agua es el elemento más importante en el crecimiento de los vegetales (INPOFOS, 1997).

a. Contenido de los suelos

La capa arable de la mayoría de los suelos contiene entre 0,02% y 0,4% de nitrógeno. Para casos particulares esto evidentemente está influenciado por el clima, tipo y cantidad de vegetación, topografía, material parental, actividad del hombre, fotoperiodo y otros factores.

b. Formas del nitrógeno del suelo

- **Nitrógeno Inorgánico**

Las formas inorgánicas del nitrógeno del suelo incluyen: nitratos (NO_3^-), nitritos (NO_2^-), óxido nitroso (N_2O), óxido nítrico (NO), amonio (NH_4^+), amoniaco (NH_3). Desde el punto de vista de fertilidad del suelo, las formas NH_4^+ , NO_2^- y NO_3^- son las de mayor importancia, porque así es como absorben las plantas este elemento. El NH_4^+ se encuentra generalmente en forma intercambiable adsorbido a los coloides del suelo.

El NO_2^- y el NO_3^- se encuentran en solución en el agua del suelo. Los tres reunidos representan 2% del nitrógeno total. Las formas NH_3^+ , N_2O y NO son gases y se encuentran en muy pequeñas cantidades, generalmente no son posibles de detectar. De estas el N_2O y el NO tienen importancia negativa porque es así como se pierde el nitrógeno del suelo por nitrificación (Padilla, W, 2002).

- **Nitrógeno Orgánico**

Las formas orgánicas del nitrógeno del suelo se hallan como aminoácidos y proteínas consolidadas, aminoácidos libres, amino-azúcares y otros compuestos no identificados. El contenido de N en la materia orgánica es del 5% y únicamente el 1% está disponible para las plantas.

- **Transformaciones del nitrógeno en los suelos**

Las plantas absorben la mayor parte de su nitrógeno en forma de NH_4^+ y NO_3^- , las cantidades de estos dos iones que pueden utilizarse por las raíces de los cultivos, dependen:

- a. De la cantidad suministrada como fertilizante que ha sido liberada luego de haberse establecido un equilibrio entre la mineralización y la inmovilización del nitrógeno del suelo.
- b. De las pérdidas en el terreno.

Fósforo (P)

El compuesto mineral fosforado más comúnmente encontrado en el suelo está en la forma de fosfato de calcio.

Este compuesto ocurre en tres grados de disponibilidad para las plantas.

- Fosfato monocálcico, el cual es soluble en agua y es inmediatamente disponible para las plantas.
- Fosfato dicálcico, el cual no es soluble en agua pero es soluble en citratos (en los fertilizantes, la definición legal describe esta forma como disponible), es más lentamente disponible para las plantas.
- Fosfato tricálcico, el cual no es soluble ni en agua ni en citratos.

Cuando se añade fósforo al suelo en cantidades grandes la solubilidad de la masa total de fósforo en el suelo es más alta que cuando se añade cantidades pequeñas, debido fundamentalmente al proceso de fijación que experimentan algunos suelos.

Se entiende por fijación de fósforo a cualquier cambio en la que un fertilizante fosfórico está disponible para las plantas.

La solubilidad o disponibilidad del fósforo para las plantas, está íntimamente relacionado con el pH del suelo. Al incrementar el pH del suelo, la solubilidad de los sistemas Fe-P + Fe (OH)₃, se incrementan. Al-P y Fe-P solos decrecen en solubilidad al incrementar el pH. La más alta solubilidad a pH bajo, se debe a la acción ácida de disolución. Cuando se tienen presentes los sistemas Al-P+Al (OH)₃ o Fe-P+Fe (OH)₃, el incremento en acidez (baja de pH), disuelve a los hidróxidos de Al y Fe y pone mayor concentración de estos iones en solución y la solubilidad del fósforo decrece notablemente debido a que reaccionan con Al y Fe y se precipitan.

Al incrementar el pH, la solubilidad del Ca-P, decrece debido a la tendencia que existe de formar compuestos hidratados de Ca-P+Ca (OH)₂, fosfatos de calcio y calcio intercambiable el cual pasa a ocupar los sitios de intercambio en la matriz. (Iñiguez M, 1975).

Potasio (K)

Es uno de los elementos requeridos en grandes cantidades por las plantas. Se encuentran en los suelos en cantidades variables y es absorbido por las plantas en forma de ion K⁺. El contenido de potasio de los suelos y de los fertilizantes se expresan también en forma de K₂O, tomando en este caso el nombre de potasa. Por lo general, los suelos contienen más potasio que cualquiera de los otros nutrientes más importantes y la mayor parte se encuentra en forma de silicatos insolubles como feldespatos y micas. En suelos muy arenosos el potasio se infiltra aunque no tan rápidamente como el nitrógeno en forma de nitratos. En suelos pesados o arcillosos la infiltración es lenta, ya que las partículas finas de estos suelos, tienen la propiedad de absorber física y químicamente el potasio (Padilla, W, 2002).

- **Potasio intercambiable**

El potasio intercambiable es el ion K^+ , que está retenido eléctricamente a las partículas de arcilla y coloides orgánicos que conforman el complejo de intercambio. Este potasio intercambiable se lo considera disponible para la planta y es el potasio que se lo determina en un análisis de suelos. El potasio liberado por reacciones químicas desde los minerales que son degradados, es la fuente del potasio intercambiable en suelos vírgenes.

El movimiento del potasio en el suelo varía ampliamente y depende del tipo de suelo y en la mayoría de los casos el potasio se mueve con limitación. El potasio puede lixiviarse en suelos arenosos y en suelos con muy baja capacidad de intercambio catiónico, pero donde se aplican dosis normales de fertilizante, pérdidas por lixiviación de K son extremadamente pequeñas bajo la mayoría de condiciones.

A menos que los niveles de potasio sean muy bajos, aplicaciones anuales de fertilizantes potásicos son preferibles a aplicaciones masivas, intentando mantener niveles altos por algunos años, debido a la posibilidad de fijación o lixiviación, esto generalmente para cultivos anuales o semiperennes. Para el caso de cultivos intensivos, hortícolas o florícolas, la aplicación frecuente de potasio es la más adecuada, en bajas dosis y con fuentes de alta solubilidad. Si se aplica K por fertirrigación, aplicaciones diarias mantienen al cultivo en óptimas condiciones lo que da lugar a alcanzar rendimientos muy altos y de calidad (INPOFOS, 1997).

Calcio (Ca)

En la nutrición vegetal, el calcio, magnesio y azufre desempeñan el papel de macronutrientes. Son elementos abundantes y en general su provisión en el suelo es suficiente para cubrir las necesidades de las plantas. Por eso, no se piensan en ellos como fertilizantes. Los fertilizantes y enmiendas aportan al suelo grandes cantidades de calcio, magnesio y azufre.

El calcio (Ca), magnesio (Mg) y el azufre (S) se los denomina elementos secundarios debido a que las plantas utilizan cantidades considerables de ellos en su crecimiento normal, pero estos elementos, por lo general no son agregados al suelo como fertilizantes en cantidades grandes. El calcio y magnesio se usan en forma de cal para aumentar el pH de los suelos ácidos. Es indudable que las aplicaciones de calcio y magnesio en abonos aportados al suelo con otro objetivo, eliminan muchas deficiencias.

Aunque el calcio contenido en el suelo puede alcanzar valores muy elevados, especialmente en los suelos calizos, las fracciones más activas e importantes del sistema son el Ca^{++} cambiante y el Ca^{++} en solución. El Ca^{++} por su carga y reducida hidratación es adsorbido más fuertemente que Mg^{++} , K^+ y Na^+ por el complejo coloidal del suelo, con la excepción de las posiciones que tienen gran afinidad por el K^+ y por el NH_4^+ , que compite en cierta medida con dicho ion. Sin embargo, el Ca^{++} suele ocupar entre el 30 y el 90% de la capacidad total de cambio del suelo.

La mayoría del calcio intercambiable es disponible para la planta, a pesar de que el calcio contenido en los minerales primarios y secundarios está disponible en forma muy lenta. Razón por la cual, un análisis del calcio total no está muy relacionado con la asimilación de calcio y la nutrición y crecimiento de las plantas (Tomé, 1997).

Magnesio (Mg)

El magnesio se origina por la meteorización de las rocas que contienen minerales primarios, tales como la biotita, la dolomita, hornblenda, olivino, el piroxeno y la serpentina. También se encuentra en los minerales de las arcillas como la clorita, illita, montmorillonita y vermiculita. Durante la meteorización mineral de las rocas, el magnesio es liberado a la solución del suelo donde (1) puede perderse por lixiviación (2) puede ser absorbido por organismos vivos (3) adsorbido por la CIC (4) o precipitar como mineral secundario, especialmente en climas áridos. El magnesio en los minerales de las arcillas se pierde lentamente en el agua usada en los riegos y por un exhaustivo manejo de cultivos.

La Vermiculita tiene un alto contenido de magnesio y puede ser una fuente significativa de magnesio en los suelos.

Las condiciones donde el magnesio puede presentar deficiencias incluyen suelos ácidos, arenosos, con mucha humedad y baja CIC, calcáreos, suelos ácidos que reciben una gran cantidad de materiales limosos bajos en Mg, alta fertilización de NH_4 o K^+ y manejo de cultivos con gran demanda de magnesio (Padilla, W, 2002).

El magnesio en el suelo como ha quedado indicado, se encuentra como magnesio intercambiable o en la solución del suelo predominantemente. La absorción de magnesio por las plantas depende de la cantidad existente en la solución del suelo, de pH del suelo, del % de saturación en la CIC, de la cantidad de otros elementos intercambiables y del tipo de arcilla (Padilla, W, 2002).

Azufre (S)

En la actualidad el uso de fuentes de azufre en la fertilización se ha hecho más necesario debido a su deficiencia en el suelo, causado por el consumo por parte de los cultivos y la falta de reposición por ausencia de fuentes que antiguamente contenían azufre como parte de su componente.

Una fuente natural de azufre constituyen las rocas ígneas y metamórficas en las cuales se puede encontrar azufre en concentraciones de 300 a 700 $\mu\text{g g}^{-1}$. Mediante el proceso de oxidación los sulfuros presentes en estos materiales, se oxidan en condiciones aeróbicas y se forman los sulfatos. En los suelos de la costa es fácil encontrar fuentes de azufre que se han formado a partir de marismas, las cuales son ricas en sulfuro ferroso o sulfato de calcio.

Los suelos de regiones áridas pueden contener hasta 1% de azufre, en sus capas superficiales y principalmente en la forma de sulfatos de calcio, magnesio, potasio o sodio, pero este azufre no siempre está disponible para los cultivos debido a su alto pH. La meteorización, el lavado y la absorción de las plantas, reduce la cantidad de azufre mineral en el suelo, de tal forma que la mayor parte del azufre se encuentra como componente de la materia orgánica, que presenta una relación N/S entre 10/1 y 10/2 (en un ámbito de 6 a 8,1%) (Inpofos, 2000).

Micronutrientes

El papel de los micronutrientes es sumamente complejo y está asociado con procesos esenciales en los que trabajan conjuntamente con otros nutrientes. A continuación se presenta de manera muy general las principales funciones de los seis micronutrientes:

- **Zinc:** Interviene en la formación de hormonas que afectan el crecimiento de las plantas. Participa en la formación de proteínas. Si no hay una cantidad adecuada de Zinc en la planta, no se aprovechan bien el Nitrógeno ni el Fósforo. Favorece a un mejor tamaño de los frutos.
- **Boro:** Se relaciona con el transporte de azúcares en la planta. Afecta la fotosíntesis, el aprovechamiento del Nitrógeno y la síntesis de proteínas. Interviene en el proceso de floración y en la formación del sistema radicular de la planta y regula su contenido de agua.
- **Hierro:** Es necesario para la formación de la clorofila, es un constituyente importante de algunas proteínas y enzimas. Es catalizador en los procesos de oxidación y reducción de la planta.
- **Cobre:** Catalizador para la respiración y constituyente de enzimas. Interviene en el metabolismo de carbohidratos y proteínas. Síntesis de proteínas.
- **Manganeso:** Influye en el aprovechamiento del nitrógeno por la planta, actúa en la reducción de los nitratos. Importante en la asimilación del anhídrido carbónico (fotosíntesis) y en la formación de caroteno, riovoflavina y ácido ascórbico.
- **Molibdeno:** Es importante en la síntesis de proteínas y en la fijación simbiótica del Nitrógeno. También ha sido asociado a los mecanismos de absorción y traslación del hierro.

Los micronutrientes (también llamados oligoelementos) son nutrientes esenciales para el crecimiento vegetal, pero que las plantas consumen en muy pequeñas cantidades (del orden de algunos gramos o cientos de gramos por hectárea). Esto es debido a que los micronutrientes no son elementos plásticos y solos forman parte constitutiva de las enzimas o activadores de ellas.

No obstante, la deficiencia de cualquier micronutriente puede provocar problemas en el crecimiento de la planta y desarrollo de las raíces, repercutiendo en la producción, tanto en calidad como en cantidad (López, A., y J. Espinosa. 1995).

Además el Cobalto (Co) es un elemento beneficioso para algunos cultivos y fundamental en la fijación biológica del N.

Los micronutrientes de naturaleza metálica (Fe, Mn, Cu y Zn) se encuentran presentes en los suelos y sustratos principalmente como óxidos, hidróxidos o como otras sales bastante insolubles a pH altos.

Para el diagnóstico de las carencias no es suficiente con un examen visual, puesto que deficiencias de diferentes elementos dan lugar a síntomas externos muy similares, de ahí, que sea necesario realizar análisis de suelo y, preferiblemente, de las hojas.

Los siguientes factores pueden producir carencias de nutrientes:

- Por la falta del micronutriente en cantidad suficiente en el suelo, por lo que la planta no puede tomarlo en la cantidad precisa. Esta carencia la podríamos llamar “absoluta” y raramente se da.
- Por no encontrarse en el suelo en estado asimilable, es decir disponible para el cultivo, por estar “bloqueado” en algún componente del suelo o por la presencia de otros elementos. En este caso la carencia es “inducida”, como es el caso de la clorosis férrica inducida por la presencia de bicarbonato o el bloqueo que sufre el B por el Ca.

2.2. Factores que afectan la disponibilidad de micronutrientes

Son varios los factores que pueden afectar a la disponibilidad, y por lo tanto, a la absorción de micronutrientes por las plantas.

- El pH del suelo, tiene una enorme influencia, un pH alto disminuye la solubilización, absorción del cobre, zinc, hierro y cobalto, y específicamente la del manganeso, aumentando, en cambio, la del molibdeno y azufre.

- La textura es otro de los factores que influyen en el contenido de micronutrientes en el suelo. Así, en suelos de texturas gruesas (muy arenosos) es más frecuente la carencia de manganeso, cobre, zinc, boro y molibdeno, debido a que estos nutrientes son lavados en estos suelos con facilidad.
- El contenido de materia orgánica, tiene gran influencia sobre la disponibilidad de micronutrientes. Diferentes autores han reseñado cantidades crecientes de micronutrientes en el suelo al aumentar el contenido de materia orgánica del mismo, aunque en ocasiones los resultados han sido contrarios (Fuentes, J. 2009).

2.3. Interpolación y modelación espacial de variables biofísicas

Para la interpolación de las variables no se consideran importantes criterios como el origen del suelo, el material de partida y otros, sino que se toma al suelo como cuerpo resultado de una variabilidad natural y que fue muestreado según condicionantes sociales y económicas.

Haciendo varias observaciones en áreas pequeñas y dejando de lado algunos sectores importantes debido al alto rendimiento y que las tierras están ocupadas por grandes sectores económicos, se han realizado interpolaciones con el objeto de homogeneizar la información, permitiendo que los sectores donde los valores son más válidos sean los sitios de intervención de las ERAS.

Conceptos

a. Interpolación

La interpolación es un proceso que permite modelar variables espaciales, predecir su comportamiento, determinar radios de influencia y tiempos de duración de un fenómeno. También resuelve problemas de decisión frente a procesos que se ven afectados por el comportamiento de ciertas variables, y en general, para proveer información ya sea sobre el presente o un futuro probable.

La estimación de valores desconocidos a partir de una muestra mediante técnicas de interpolación se practica constantemente en muchas áreas de la ciencia, y de hecho con frecuencia son inseparables de los procesos realizados en el arte de la investigación, en especial los relacionados con las ciencias de la tierra. El proceso normal es obtener a partir de una muestra el comportamiento general de un fenómeno. (Henaó, R, 2005).

La interpolación espacial es el procedimiento que se utiliza para estimar valores de una o más variables en lugares donde no existe o no se conoce información a partir de mediciones en puntos ubicados en la misma área o región. Cuando la estimación de los valores de las variables se hace en lugares por fuera del área que cubren las mediciones tomadas, el proceso se llama extrapolación.

La interpolación espacial proporciona diferentes metodologías para realizar el análisis de datos espaciales, la Interpolación Geoestadística y la Interpolación Simple. Ambas metodologías pueden hacer estimaciones globales o locales, y tienen interpoladores exactos como aproximados. La diferencia entre estas radica en los supuestos que se hacen en cada una, en el número de parámetros de decisión que intervienen y en la predicción del error de estimación (García, N, 2009).

La interpolación simple se basa en un principio de las ciencias naturales del cual se deriva la continuidad de los datos, donde en un proceso dado, la razón de cambio es constante y como mínimo se deben conocer dos valores, de lo contrario se hace imposible conocer el error de la estimación.

b. Geoestadística

La Geoestadística por su parte, en su análisis utiliza métodos exploratorios y de interpolación, estos métodos requieren un conocimiento básico estadístico, pues cuando hay variación irregular en los datos, la muestra es representativa y/o la interpolación simple arroja resultados incoherentes con la realidad, los métodos geoestadísticos proporcionan estimaciones probabilísticas de la calidad de la interpolación.

Paralelamente, proporcionan una herramienta (semivariogramas) que permiten explorar y obtener una mejor comprensión de los datos, además se tiene el control para crear las mejores estimaciones basadas en la información disponible, permitiendo la toma de decisiones óptimas. (García, N, 2009).

Hoy en día, la Geoestadística es un nombre asociado con una clase de técnicas, para analizar y predecir los valores de una variable que está distribuida en espacio o tiempo. Se asumen tales valores implícitamente, para ser puestos en correlación entre sí, y el estudio de semejante correlación normalmente se llama un "análisis estructural" o un "Variograma".

Después del análisis estructural, se hacen estimaciones a las situaciones de los sectores no muestreados usando la técnica de interpolación "Kriging".

La Geoestadística, tiene como objetivo el caracterizar e interpretar el comportamiento de los datos que están distribuidos espacialmente "variables regionalizadas" (Rodríguez, J, 2005).

Los pasos principales de un estudio Geoestadístico son:

- Análisis de los datos exploratorios.
- Análisis Estructural (Cálculo y modelación de los Variogramas).
- Estimaciones (Kriging o simulaciones).

c. El Variograma

Es un estimador de la varianza poblacional, por lo tanto la población debe tener una tendencia de estacionalidad. El variograma está relacionado con una dirección y distancia (h), es la principal herramienta básica, que da soporte a las técnicas de Kriging, permite representar cuantitativamente la variación de un fenómeno regionalizado en el espacio. El variograma modela como dos valores en el espacio o tiempo que se ponen en correlación (Matheron G, 2005).

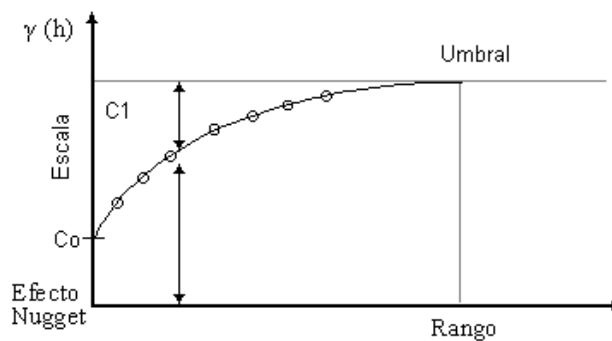


Figura 1. Modelo de variograma.

El Variograma está conformado por los siguientes elementos:

- *Efecto Nugget (Co)*: Generalmente el variograma no tiende a cero como lo hace la distancia h , el *Efecto Nugget* indica la discontinuidad del semivariograma para distancias que sean menores, que la menor distancia que se da entre los puntos muestrales.
- Parte de esta discontinuidad puede también ser dividida en errores de medición, una pobre precisión analítica, o más a menudo por mineralización altamente errática a baja escala.
- *Umbral (Sill = C1 + Co)*: Es el valor alcanzado por el variograma en el *Rango*. El Sill de un variograma, puede ser denotado como la varianza de la muestra.
- *Escala (C1)*: Es el valor tal que; $C1 + Co = Sill$.
- *Rango (a)*: Es la distancia dentro de la cual, las muestras están correlacionadas espacialmente.

d. Cálculo del Variograma

Para calcular el variograma se debe definir un incremento lag, tomar todos los pares de puntos que tengan esa distancia entre ellos, calcular el cuadrado de las diferencias para cada par de puntos, resumir todas las diferencias y luego dividir para dos veces el número de pares de puntos que tienen esta distancia entre sí, este resultado es el valor del variograma. Se debe hacer lo mismo para otros incrementos lag. (Matheron, G, 2005).

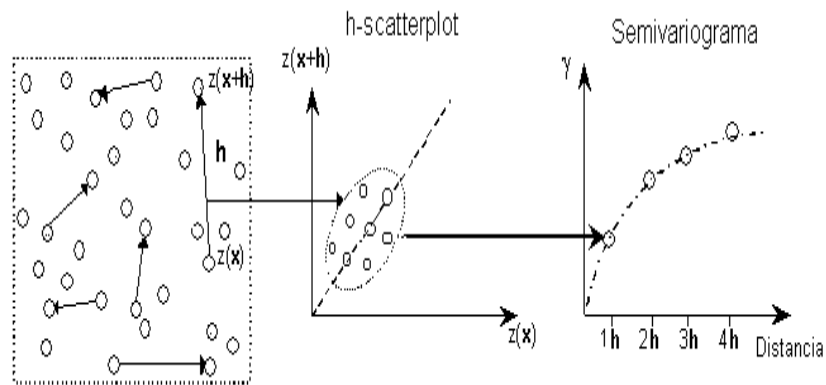


Figura 2. Construcción del variograma desde datos muestreados.
Fuente: (Ai-Geoestats).

El variograma es definido como:

$$2 \gamma(h) = \text{Var.} [Z(x+h) - Z(x)] = E\{[Z(x+h) - Z(x)]^2\}$$

e. Modelos Teóricos del Variograma

Son varios los modelos básicos de los Variogramas, que son capaces de explicar los diferentes comportamientos que pueden presentar las variables regionalizadas; entre los modelos más usuales que se dan tenemos:

- **Modelo Esférico**

Este modelo, presenta una tendencia creciente curvilínea, hasta que llega al *Sill*, para tomar una tendencia lineal. El modelo Esférico alcanza el valor *Sill*, en la distancia a (*rango actual*).

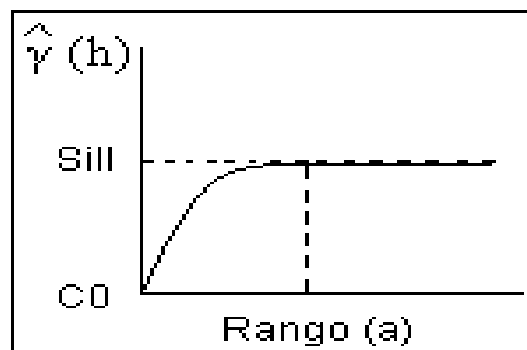


Figura 3. Modelo esférico.

- **Modelo Exponencial**

El modelo Exponencial, alcanza el valor *Sill* asintóticamente, el *rango (a)* es la distancia a la cual el valor del modelo, es el 95 % del *Sill*.

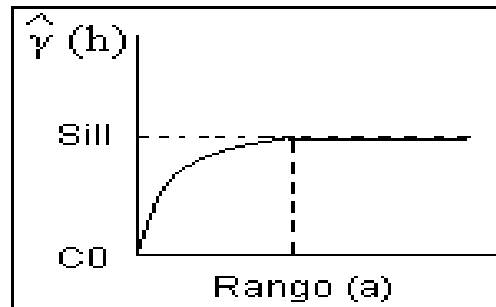


Figura 4. Modelo exponencial.

- **Modelo Gaussiano**

El modelo Gaussiano, alcanza el valor *Sill* asintóticamente, el *rango (a)* es la distancia a la cual el valor del modelo, es el 95 % del *Sill*.

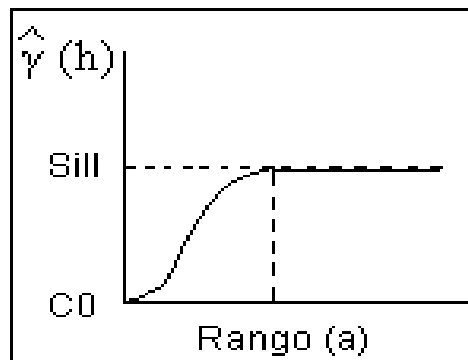


Figura 5. Modelo Gaussiano.

- **Modelo Lineal**

No posee valor *Sill*, continua aumentando mientras la *distancia (h)* aumenta, es utilizado para modelar fenómenos que presentan capacidad infinita de dispersión.

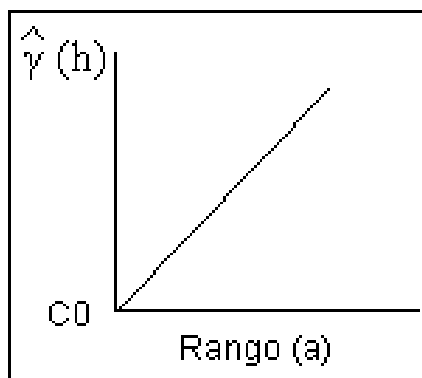


Figura 6. Modelo Lineal.

f. Anisotropía

Si al calcular Variogramas en diferentes direcciones, los valores del *rango* (a) presentan cambios, esto nos indica que se está dando una anisotropía geométrica, en cambio si la diferencia muestra cambios en el valor del *Sill* en diferentes direcciones, entonces hay una anisotropía zonal. Algunos Variogramas son combinaciones de anisotropía geométrica y zonal.

Se debe calcular varios Variogramas en diferentes direcciones, y hacer uso de un diagrama de rosa, para descubrir la existencia de anisotropía. La proporción de la anisotropía es la proporción entre el rango más pequeño y el rango más grande, utilizando una proporción de uno, indica un variograma isotrópico, es decir el mismo variograma en todas las direcciones (círculo isotrópico). (Oliver, M y Webster, R, 1990).

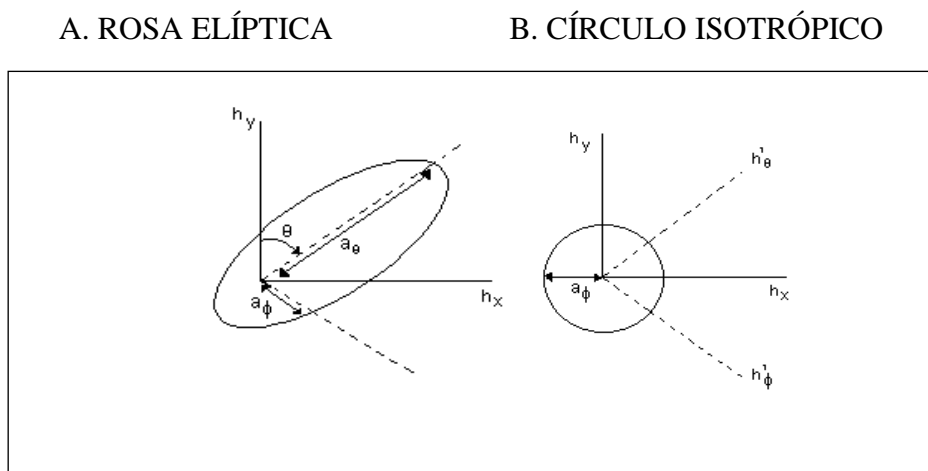


Figura 7. Dirección de la Anisotropía.

Fuente: Geostatistics for natural resources evaluation

g. Kriging

El Kriging es conocido como el método interpolador Geoestadístico, es un estimador lineal insesgado, presenta dos propiedades básicas, hacer que la suma de errores tienda a cero, y que el cuadrado de las desviaciones sea mínimo.

Tiene como objetivo estimar el valor de la variable Z, para un punto x_0 que no ha sido considerado anteriormente, realiza una suma ponderada sobre todos los sectores que conforman la zona de estudio de interés, tomando los vecinos más cercanos al punto de interés x_0 .

$$\hat{Z}(x_0) = \lambda_1 z(x_1) + \lambda_2 z(x_2) + \dots + \lambda_n z(x_n)$$

$$\hat{Z}(x_0) = \sum \lambda_i * z(x_i)$$

El proceso del Kriging es asignar pesos a los vecinos más cercanos, considerados para la estimación, la diferencia del Kriging con otros métodos de interpolación, es que utiliza un método semejante a la interpolación por media móvil ponderada, a diferencia que los pesos son asignados a partir de un análisis espacial, basado en el semivariograma experimental. (Henao R, 2005).

Un método de interpolación será exacto cuando, pase por los puntos muestreables lo más cercano posible a ellos. Es importante que un modelo para semivariograma que ha sido ajustado, represente una tendencia a los modelos antes descritos, para que las estimaciones obtenidas por medio del Kriging sean más exactas y más confiables (Oliver M.A, 1990).

h. Métodos de Estimación del Kriging

- **Kriging Ordinario**

Es el método más apropiado, para situaciones agroambientales, este método asume que las medias locales, no están necesariamente relacionadas lo más cercanamente a la media poblacional, por lo cual solo usa las muestras en la vecindad local para la estimación.

- **Kriging Simple**

Asume que las medias locales son relativamente constantes e iguales a la media poblacional, la cual es conocida. La media poblacional es usada como un factor en cada estimación local, a lo largo con las muestras en la vecindad local

Variables edafológicas

Constituye la información de suelos relacionada a las unidades de suelos, es decir los atributos edafológicos del mapa digital de suelos. Para el presente trabajo los atributos están estandarizados de la siguiente manera:

a. Textura (Tex)

La textura es una expresión sintética de las características de cada horizonte que dependen de la proporción de los distintos tamaños de la partícula, es decir, se define como el porcentaje en peso del suelo mineral que queda comprendido en varias fracciones de tamaño de partículas. Estas fracciones texturales son: arena (2 a 0,05 mm), limo (0,05 a 0,002 mm) y arcilla (< 0,002 mm) (De La Rosa, 2008: 199).

Las proporciones relativas individuales de las tres fracciones diferenciadas arena, limo y arcilla, se integran en las denominadas clases texturales, así la pertenencia de un suelo a una de estas clases, representa diferencias en las capacidades agronómicas. Clase determinada según el triángulo de texturas de suelos según la USDA.

Cuadro 2. Doce clases texturales de suelos.

No.	Clase Textural
1	Arenoso
2	Arenoso franco
3	Franco arenoso
4	Franco
5	Franco limoso
6	Limoso

No.	Clase Textural
7	Franco arcilloso
8	Franco arenoso arcilloso
9	Franco limoso arcilloso
10	Arcilloso arenoso
11	Arcilloso limoso
12	Arcilloso

2.4. Digital Soil Mapping

Los Mapas Digitales de Suelos (DSM) en la ciencia del suelo, se refieren a la cartografía de los suelos como predictivos o mapeo pedométrico, y es la producción asistida por ordenador de mapas digitales de los tipos de suelo y las propiedades del suelo.

El mapeo de suelos, en general, implica la creación de la población de la información espacial del suelo mediante el uso de métodos de campo y de laboratorio, junto con sistemas de indiferencia del suelo espacial y no espacial (Scull, P.; J. Franklin, O.A. Chadwick & D. McArthur, 2003).

El grupo de trabajo internacional en mapeo digital de suelos (WG-DSM) define la cartografía digital de suelos como *"la creación y la población de una bases de datos de suelos de referencia geográfica generados a una resolución dada por el uso de campo y los métodos de observación de laboratorio, junto con los datos ambientales a través de las relaciones cuantitativas"* (Lagacherie, P., McBratney, A. B., Voltz, M., 2006).

Los diferentes tipos de modelos de DSM

A continuación muestra los diferentes tipos de modelos de DSM que se utilizan en Mapas Digitales de Suelos. Una primera distinción entre modelos DSM se realiza de acuerdo a la naturaleza de la inferencia que interese.

Por lo que se distingue (1) modelos de inferencia espacial o modelos Scorpan que produce mapas y mapas de las propiedades del suelo de la clase de suelo a partir de observaciones del suelo y variables espaciales auxiliares y (2) Paisaje-Suelos que son modelos de inferencia o atribuyen los modelos que se deriva de nuevas propiedades de estos productos obtenidos previamente. (Dobos, E., Carré, F., Hengl, T., Reuter, H.I., Tóth, G., 2006).

Estos dos tipos son examinados brevemente:

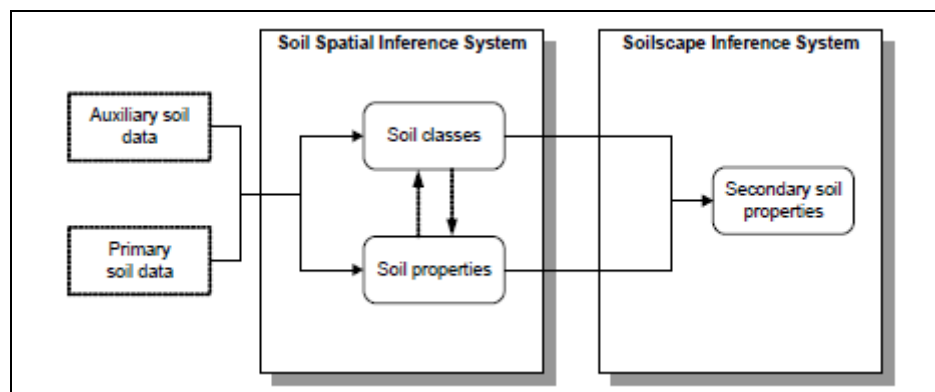


Figura 8. Tipos de modelos DMS.

Ambigüedades

El DSM se puede confiar, pero se considera que es distinta al tradicional mapeo de suelos, lo que supone la delimitación manual de los límites del suelo por los científicos en la materia del suelo. Los mapas de suelos (hojas de papel) producidos como resultado de la delimitación manual de las unidades cartográficas de suelos también pueden ser digitalizados o topografiados, pudiendo trazar límites utilizando computadoras de campo, por lo tanto ambos métodos son basados en el conocimiento y la tecnología de la cartografía de suelos que está basada en datos tradicionales en esencia *digitales* (McBratney, A.B.; M.L. Mendonça Santos, B. Minasny, 2003).

A diferencia de la cartografía tradicional del suelo, la cartografía digital de suelos considera un amplio uso de:

- Avances tecnológicos, incluyendo GPS receptores, escáneres de campo y teledetección, y
- Avances computacionales, incluyendo interpolación geoestadística y algoritmos de inferencia, GIS, modelos digitales de elevación, y la minería de datos.

En la cartografía digital de suelos, técnicas y tecnologías semi-automatizado se utilizan para adquirir, procesar y visualizar información sobre los suelos y la información auxiliar, de modo que el resultado final se puede obtener a un costo más barato. Los productos de la cartografía basada en datos o tierra estadística se evalúan comúnmente por la exactitud y la incertidumbre y se pueden actualizar con más facilidad cuando viene disponible nueva información (McBratney, A.B.; M.L. Mendonça Santos, B. Minasny, 2003).

Los Mapas Digitales de Suelos tratan de superar algunos de los inconvenientes de los mapas tradicionales del suelo que a menudo sólo se centran en la delimitación de las clases de suelo, es decir, *los tipos de suelo*. Tales mapas tradicionales de suelos no proporcionan información para el modelado de la dinámica de las condiciones del suelo y son inflexibles a los estudios cuantitativos sobre la *funcionalidad* de los suelos (McBratney, A.B.; M.L. Mendonça Santos, B. Minasny, 2003).

CAPÍTULO III

3. METODOLOGÍA

3.1 Ubicación y Límites del Proyecto

El Ecuador se encuentra situado en América del sur y está dividido en cuatro regiones geográficas, la Costa que comprende poco más de la cuarta parte del país, la Sierra constituida por las alineaciones montañosas y altiplanicies andinas, el Oriente o región Amazónica al este de los Andes, y la región Insular integrada por las islas Galápagos. La región de Galápagos comprende varias islas de origen volcánico, pero para este estudio no será considerada (<http://www.monografias.com/trabajos36/el-ecuador/el-ecuador2.shtml#ixzz3KDyv2gxg>).

Los límites se muestran a continuación

Al Norte: Colombia

Al Sur: Perú

Al Este: Perú – Colombia

Al Oeste: Océano Pacífico

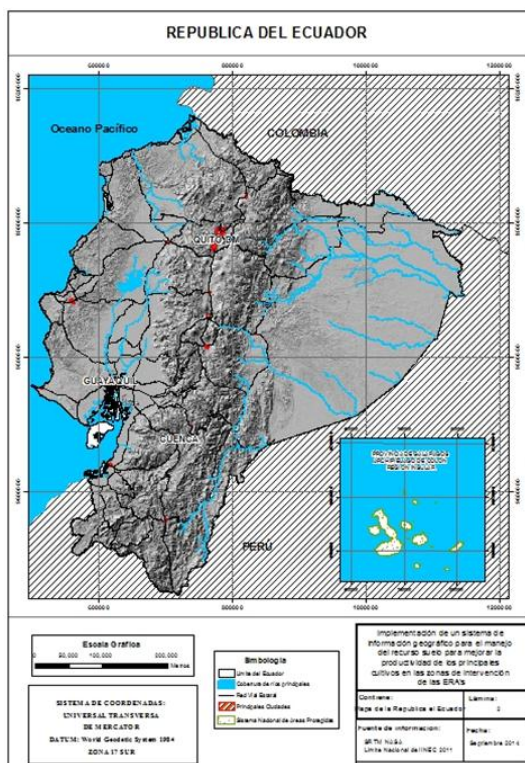


Figura 9. República del Ecuador

3.1. Aspectos Generales

Uso de la metodología adecuada

a. Colectar la información básica

Para realizar un buen análisis Geoestadístico, se necesita utilizar una muestra representativa de la variable que se desea investigar y adicionalmente para observar el resultado obtenido, se recomienda tener una espacialización de la zona o lugar donde ocurre el fenómeno a examinar (UNAM, 2004).

b. Selección de las variables a utilizar

Al seleccionar las variables, se debe escoger aquellas que tengan mayor influencia sobre el fenómeno, con un tamaño de muestra representativo.

c. Análisis Exploratorio de los datos

Antes de aplicar Geoestadística como tal, se debe hacer una depuración inicial de los datos para evitar errores en el análisis. Por ejemplo, se debe observar que tipo de distribución tienen los datos, buscar si la muestra tiene alguna tendencia, si existen valores atípicos y decidir si deben incluirse o retirarse de la muestra, analizar la distribución espacial y los estadígrafos de los valores de la variable.(UNAM, 2004)

d. Selección del método de interpolación

Se escoge el método que se va a utilizar para hacer la interpolación, bien sea determinístico (Interpolación por Distancia Inversa, Interpolación por Distancia Inversa Cuadrada, Interpolación por Shepard, Interpolación Polinomial, etc.) o estocástico (Kriging Ordinario, Simple, Universal, Residual, Indicador, Probabilístico, Lognormal, Disyuntivo, Bloques) y la variable a utilizar; es de resaltar que se puede hacer el análisis individual o en conjunto para las variables dependiendo del método de análisis que se utilice, Kriging o Co-Kriging. En

nuestro caso se utilizó el método de análisis Kriging (W. Siabato y C. Yudego, 2004).

e. Análisis estructural y cálculo

Se calcula el variograma experimental utilizando una función de correlación espacial, bien sea la semivarianza o covarianza, de acuerdo a la nube de puntos generada en el semivariograma experimental se busca el modelo teórico (Esférico, Exponencial, Gaussiano y Potencial) que mejor se ajuste y se obtiene el modelamiento del semivariograma.

Se define el número y tamaño de los Lag que se van a utilizar en el modelo (se recomienda que el tamaño del Lag sea similar a la distancia promedio que existe entre la ubicación espacial de los datos).

Se define si hay isotropía o anisotropía mediante el análisis del Semivariograma desde diferentes ángulos de referencia, con base en la existencia o no de la autocorrelación direccional se debe definir la vecindad de análisis para cada uno de los datos y posteriormente se hace la verificación del error de predicción, lo cual se puede realizar mediante Validación Cruzada. Que usa todos los datos para predecir la autocorrelación del modelo, cuyo procedimiento es omitir un valor de la variable y predecir dicho valor con los demás datos, luego se compara la predicción y el valor medido de la variable, este proceso se repite para cada uno de los valores muestreados (Díaz-Francés E, 1993).

f. Prueba, Comprobación y Selección

Se hacen diferentes ensayos para escoger el mejor método, ya sea determinístico o estocástico, y el mejor modelo dentro de ellos, en la práctica es realizar los pasos 4 y 5 tantas veces como sea necesario para encontrar el mejor modelo Geoestadístico. Escoger el método más apropiado depende del tamaño de la muestra y la precisión que se desee obtener en la predicción. Similarmente escoger el mejor modelo se fundamenta en seleccionar aquel cuyos errores de predicción sean mínimos. Si los resultados obtenidos en esta etapa no están dentro de parámetros especificados en el planteamiento del problema, se debe

regresar al paso 1, es decir, mejorar la muestra y volver a realizar el ciclo de análisis.(NIDE, 2002)

g. Salida Final

Los resultados se pueden observar en tablas como las de la Validación Cruzada, Histogramas, QQPLOT (muestra los cuantiles de las diferencias entre los errores estandarizados y los cuantiles correspondientes de una distribución normal), Análisis de Tendencia, Nubes de puntos del Semivariograma o del covariograma, etc. y/o en mapas como los de Predicción, Probabilidad, Predicción del error estándar y de cuantiles para cada uno de los anteriores pasos.

Este proceso se debe repetir para cada una de las variables que se deseen estimar dentro del análisis a realizar. Este esquema metodológico es uno de los aportes generados por este proyecto, el cual permite realizar el análisis Geoestadístico en forma general para cualquier solución planteada ante un fenómeno de ubicación espacial. (W. Siabato y C. Yudego, 2004).

3.2. Flujograma de Procedimiento

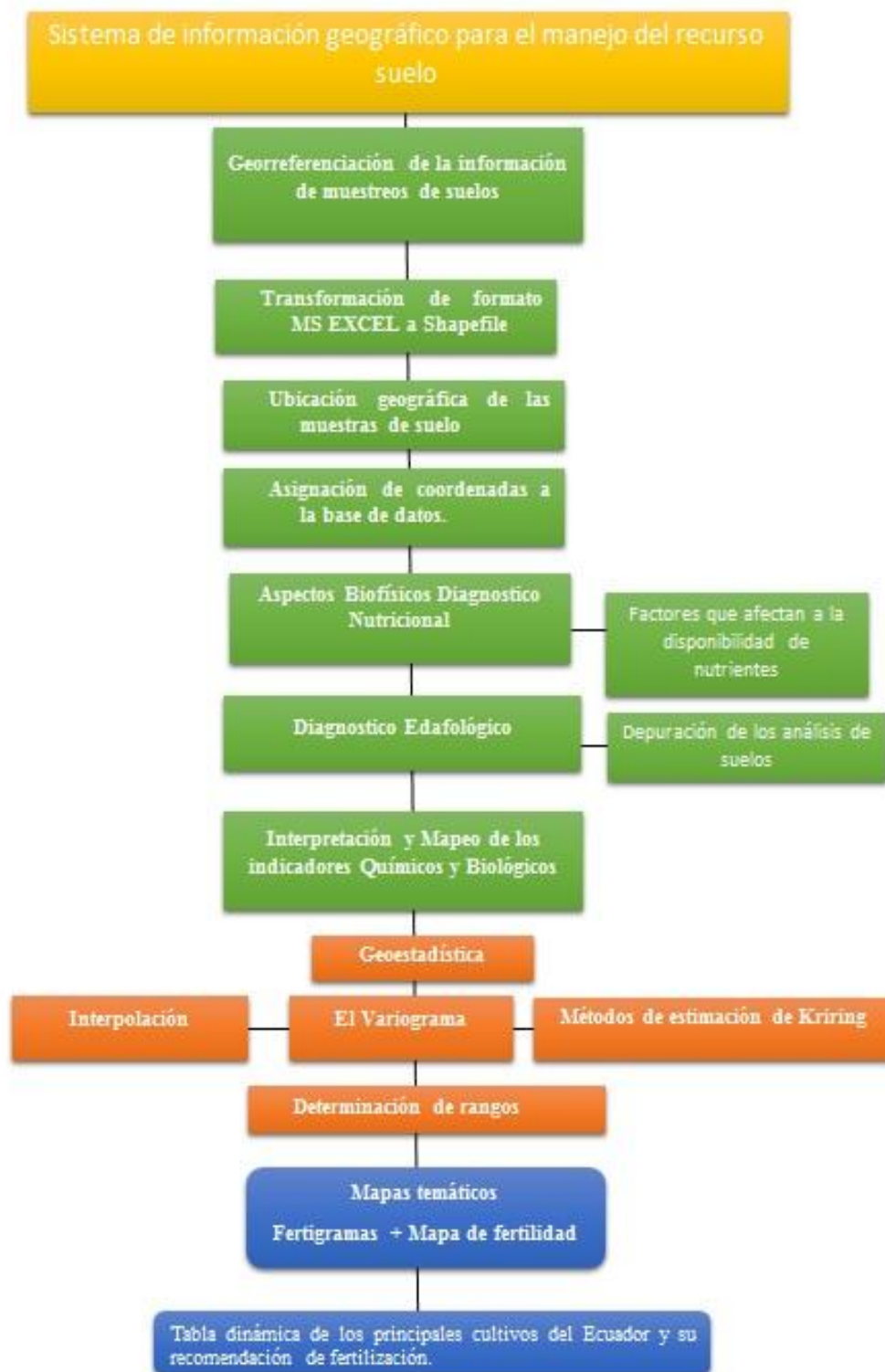


Figura 10. Flujograma de procedimientos.

3.3. Georeferenciación de la información de muestreos de suelos

La primera homologación de la información se la realizó a los datos provenientes de la información GPS adquirida en campo, donde en algunas ocasiones se anotaron de manera incorrecta los valores, en coordenadas geográficas o en diferentes zonas. Toda esta información se homogeneizó en una sola proyección, mismo Datum y misma zona para que sea visualizado en un solo plano.

La depuración de la tabla original de MS Excel consistió en dar una ubicación relativa de los análisis de suelos en base a su respectiva provincia, cantón, parroquia y sector disperso, por ejemplo un sitio de muestreo se presentó como ubicación a la provincia Pichincha, Cantón Cayambe, parroquia Aloasí, con lo cual se ubicó a la coordenada en la mencionada parroquia.

3.4. Transformación de formato MSEXCEL a shapefile

A continuación se realizó un geoprocesamiento de la información, con la opción unión de tablas utilizando la herramienta “spatial join” de la extensión ESRI ArcToolbox, donde la información geográfica de la base de datos se unió con la información física y química de suelos reportados por los laboratorios a ERAS. Generando de este modo un archivo shapefile (*.SHP) con toda la información correspondiente.

3.5. Ubicación geográfica de las muestras de suelo

Con esta metodología y para poder establecer la ubicación geográfica de las muestras que no dispone información levantada con equipo GPS en campo, se procedió a utilizar el proceso de generación de “Centroides” a partir de los polígonos de la información de división político administrativa 2011 del INEC en un formato shapefile *.SHP. Con el objeto de ubicar las Provincias, Cantones y Parroquias y de esta manera ir generando coordenadas de las parroquias donde han sido adquiridas muestras de suelo, cuando no se disponía ninguna información adicional al nombre de la parroquia.

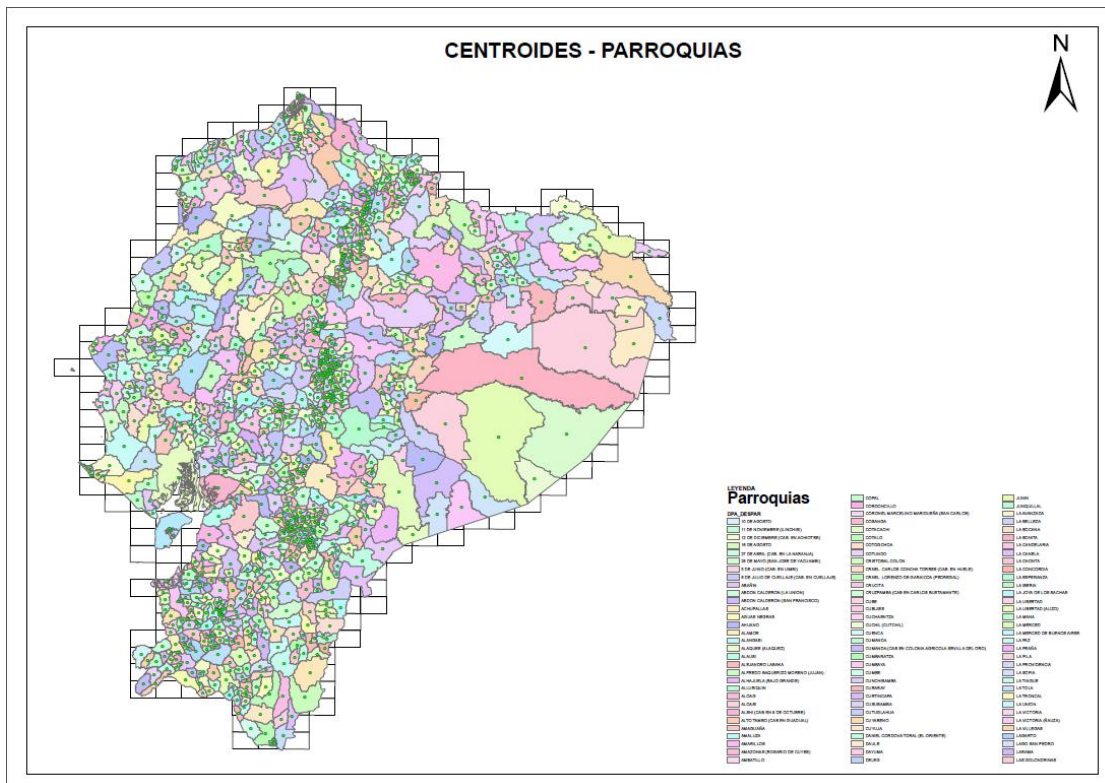


Figura 11. Metodología de generación centroides de todas las parroquias del país.

Para esto, como se había indicado, se tomó como polígono principal de referencia a la parroquia, la cual es la información más acertada de la tabla de atributos de información de las ERAS, con lo cual se puede dar una ubicación geográfica lo más cercana del punto original y de esta manera se buscó reducir el error por desplazamiento.

Con esta metodología se generó coordenadas en una misma parroquia, pero dentro de ellas se ubicaron más puntos por tanto se los debió reubicar con la información de localidad o sitio de referencia.

En la reubicación de los puntos generados como centroides de una parroquia, se utilizó como ayuda las cartas topográficas del IGM (Instituto Geográfico Militar) 1:50 000 con el fin de ir ubicando cada uno de los puntos cerca de los recintos o poblados que se describen en la información de las ERAS. Para cada punto establecido se tomó en cuenta la caracterización del uso del suelo, pendientes, zonas urbanas, centros poblados, curvas de nivel y la información de Google Earth como referencia para ubicar los sitios de muestreo.

También se analizó el uso de suelo con el fin de ubicar el muestro en áreas agrícolas que coinciden con la información de uso levantada en campo al momento del muestreo.

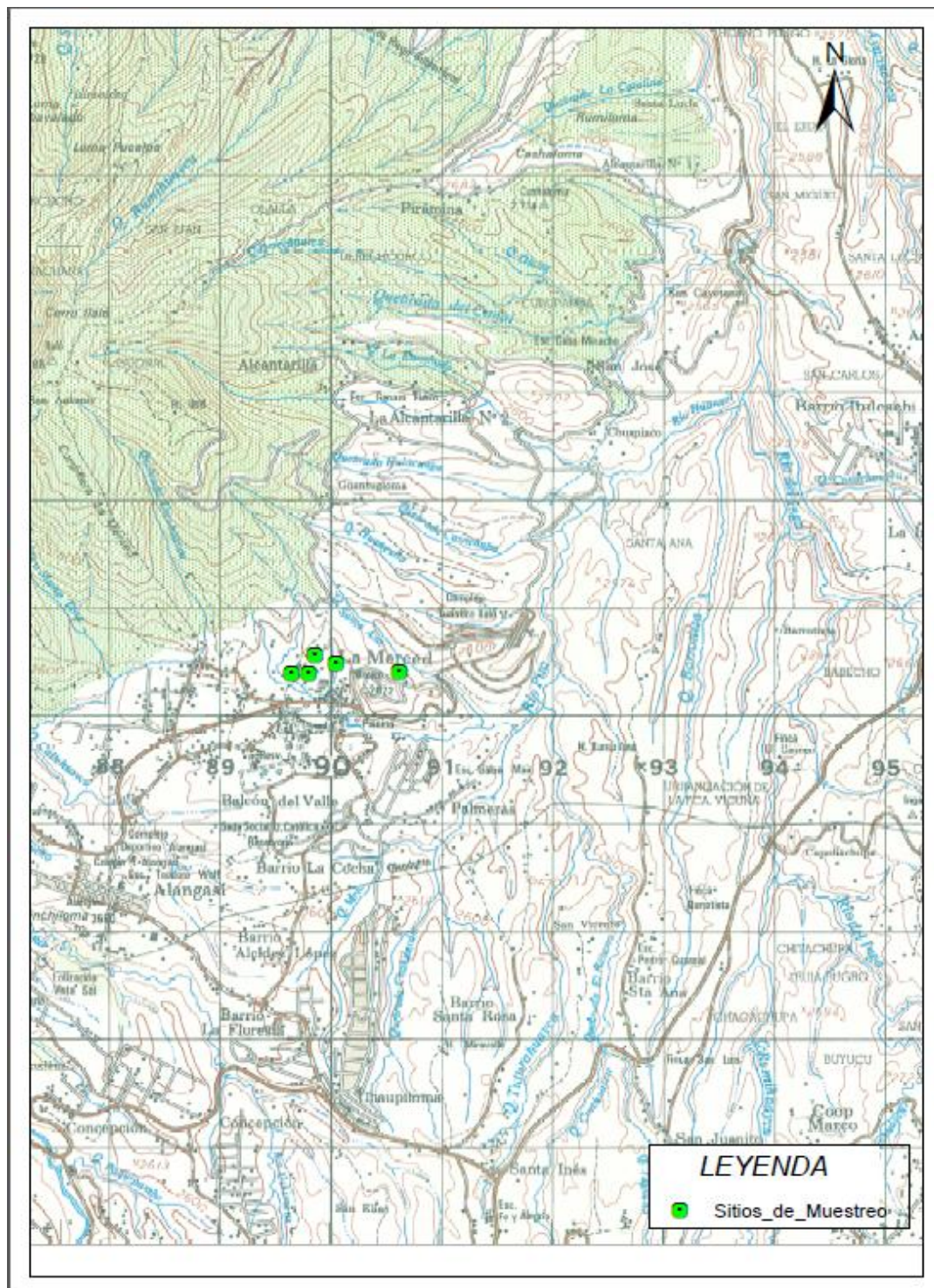


Figura 12. Trabajo en el Software ArcGis para la ubicación de los puntos cerca de cada parroquia o recinto mencionados en la información ERAS.

3.6. Asignación de coordenadas a la base de datos

Obtenida la base de datos con las muestras de análisis de suelos georeferenciadas en formato shapefile *.SHP, se asignó a todas las muestras el sistema de coordenadas basado en la Proyección Universal Transversa de Mercator y dato WGS 1984, Zona 17 Sur. Esto con la finalidad de establecer un Sistema de coordenadas general para todo el Ecuador continental y de este modo tener la información en una sola vista. Para esto se utilizó la herramienta “Define Projection” de la extensión ESRI ArcToolbox.

3.7. Fertigramas con Interpolación modelo Kriging para cada uno de los elementos químicos determinados en laboratorio

En el Anexo 1 se muestra la información levantada de campo del personal de las ERAS-MAGAP en el cual se pretende espacializar los resultados de laboratorio de las muestras recogidas de suelo, para cada elemento químico.

3.8. Análisis Exploratorio de los datos

Información Básica

Obtenidas las muestras de análisis de suelos en formato shapefile (*.shp) debidamente georeferenciadas, se procedió a revisar la variabilidad y tendencia de la información para cada uno de las variables, y de esta manera ajustar a una tendencia normal aplicando diferentes tipos de transformación geoestadística.

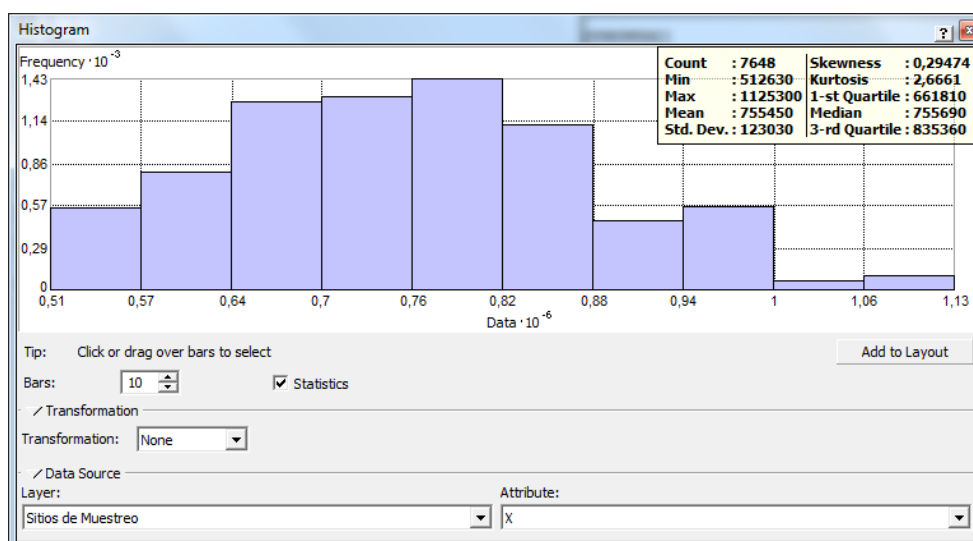


Figura 13. Histograma en la tendencia original de los datos.

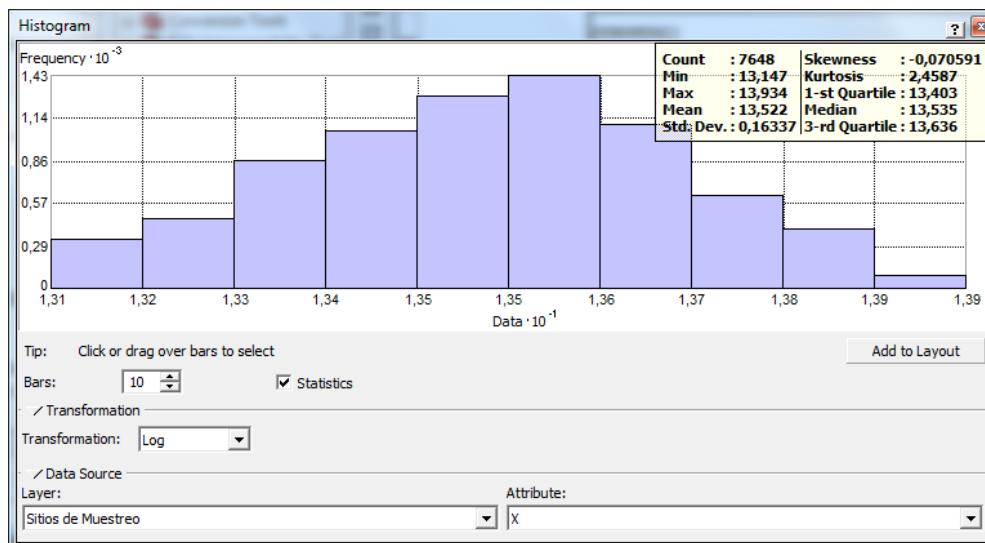


Figura 14. Histograma con transformación logarítmica para ajuste de datos.

a. Selección de las variables a utilizar

A continuación de estimar una transformación que ajuste la tendencia de los datos, se procedió a estimar el valor estándar normal de la muestra representativa para cada una de las variables.

De este modo se eliminó los extremos de los datos (colas) para reducir el tamaño del recorrido de la información y así obtener una información más homogénea.

Esto en la herramienta Geostatistical Analyst>> Explore Data >> Normal QQplot.

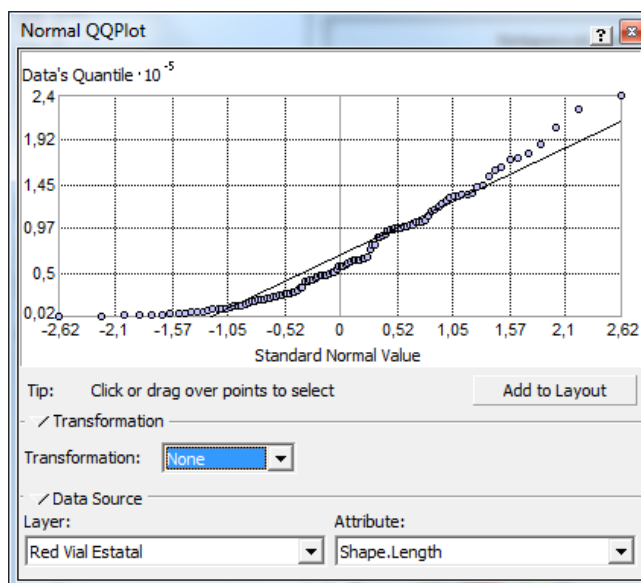


Figura 15. Valor estándar normal de la muestra para cada variable

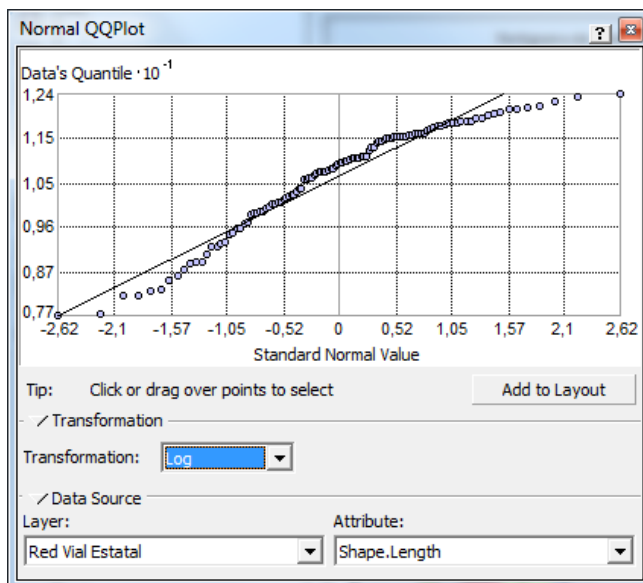


Figura 16. Valor estándar normal de la muestra para cada variable.

b. Selección del método

Como se mencionó anteriormente, Kriging un estimador lineal insesgado es el método que mayor aproximación nos da a la realidad de los datos y se lo realizó en base al siguiente procedimiento.

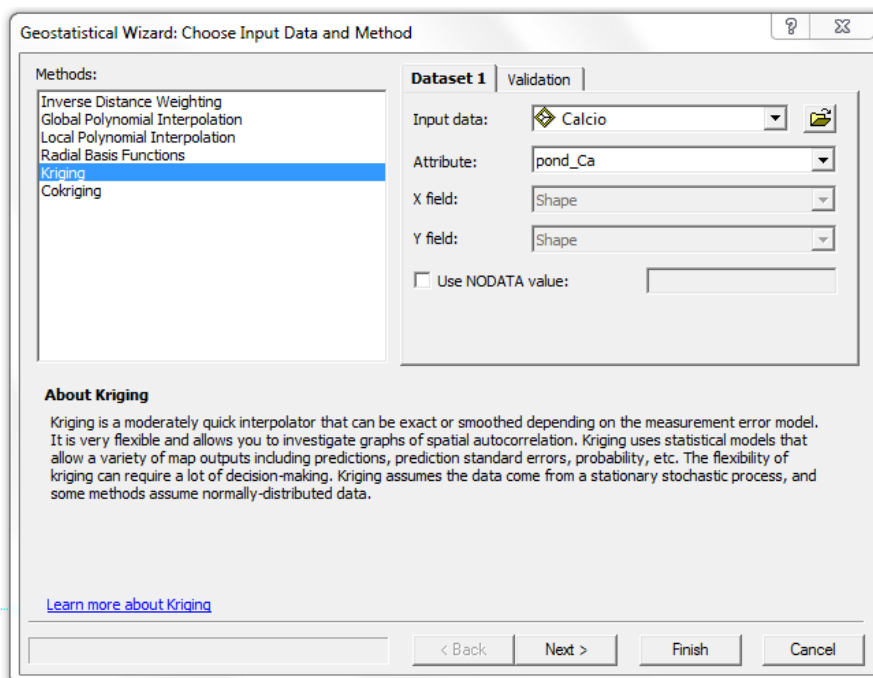


Figura 17. Kriging ordinario.

Luego de esto se eligió el histograma y el tipo de transformación a realizar a los datos, de acuerdo con el tipo de curva que presenta en la información de los datos determina el orden de eliminación de la tendencia. Para a la mayoría de las variables se realizó una transformación logarítmica. En la siguiente figura se muestra la ventana de selección.

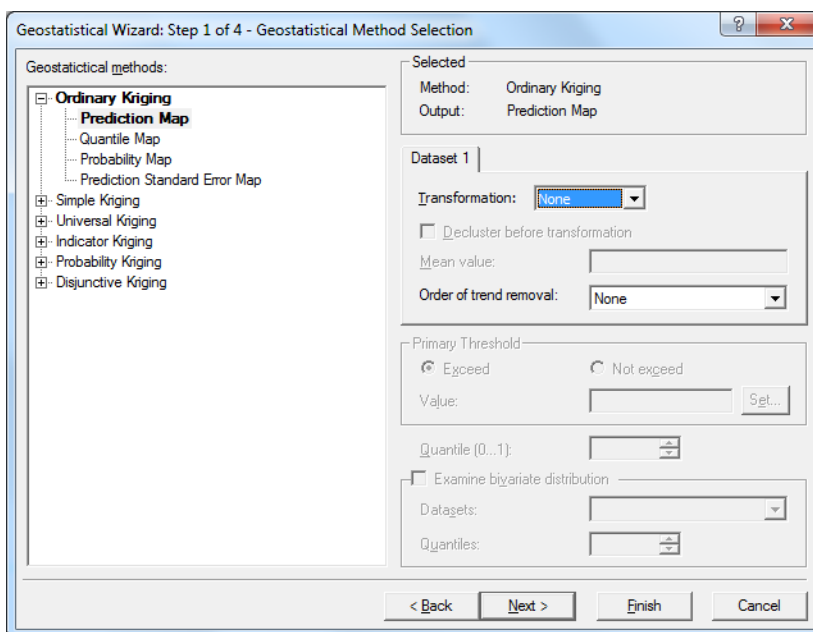


Figura 18. Transformación de datos y orden de la tendencia.

c. Análisis estructural y cálculo

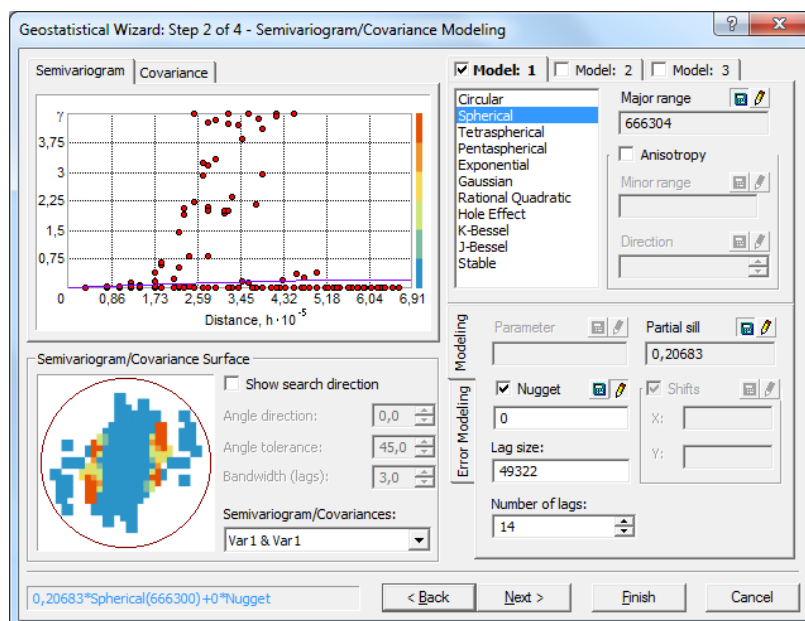


Figura 19. Tendencia de la distribución

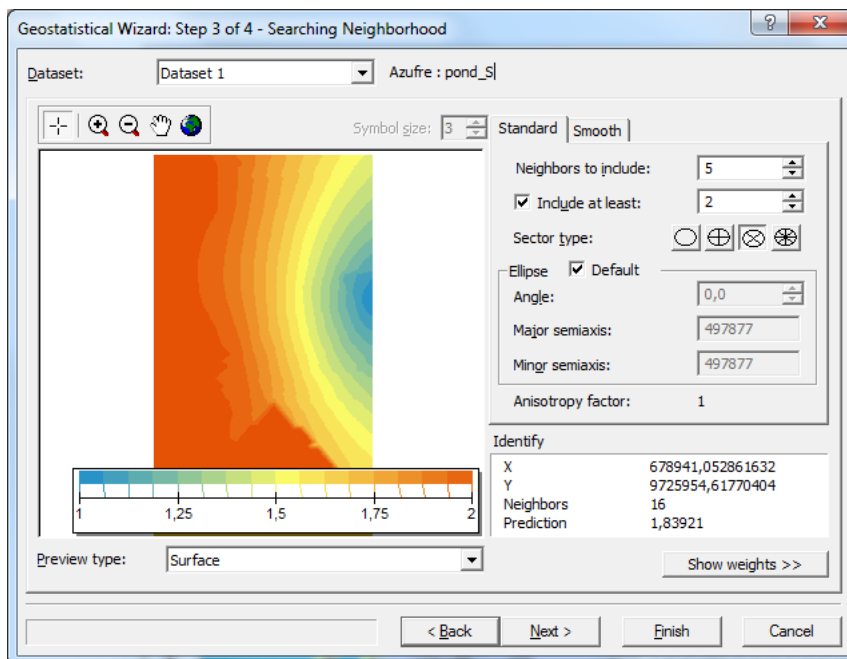


Figura 20. Semivariograma.

Se calculó el variograma experimental con la función de correlación espacial mediante la semivarianza, determinando así el número de puntos más cercanos a la línea de tendencia como se puede observar en la figura a continuación de acuerdo a la nube de puntos generada en el semivariograma experimental donde se buscó el modelo teórico (Esférico, Exponencial, Gaussiano y Potencial) que mejor se ajuste con el fin de obtener el modelamiento del semivariograma. Finalmente se define el número y tamaño de los “Lag” que se van a utilizar en el modelo.

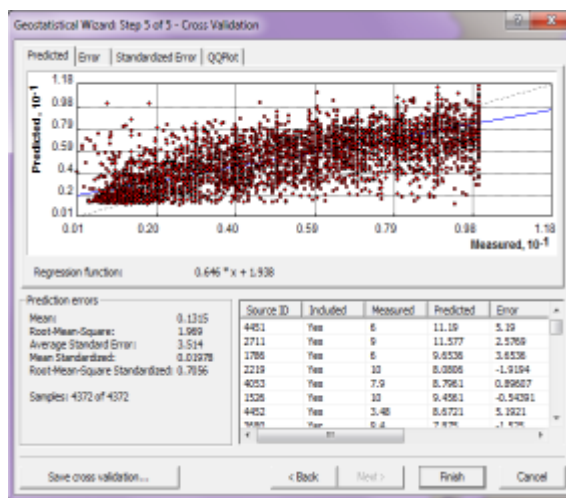


Figura 21. Predicción

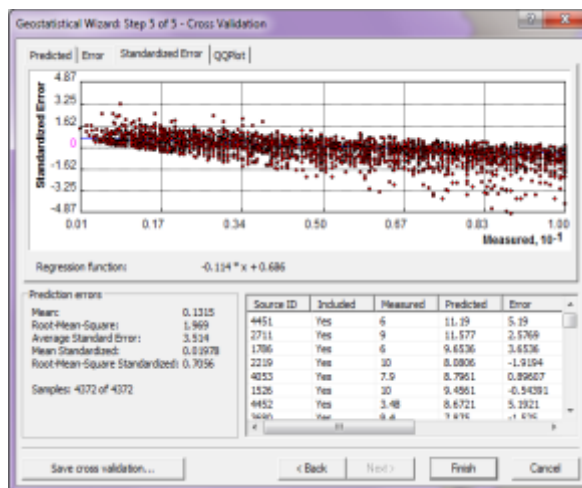


Figura 22. Error de modelo de interpolación.

Al seleccionar el modelo teórico adecuado al que se ajuste la tendencia de los datos, se procede a revisar el error estandarizado junto con el ajuste de la información.

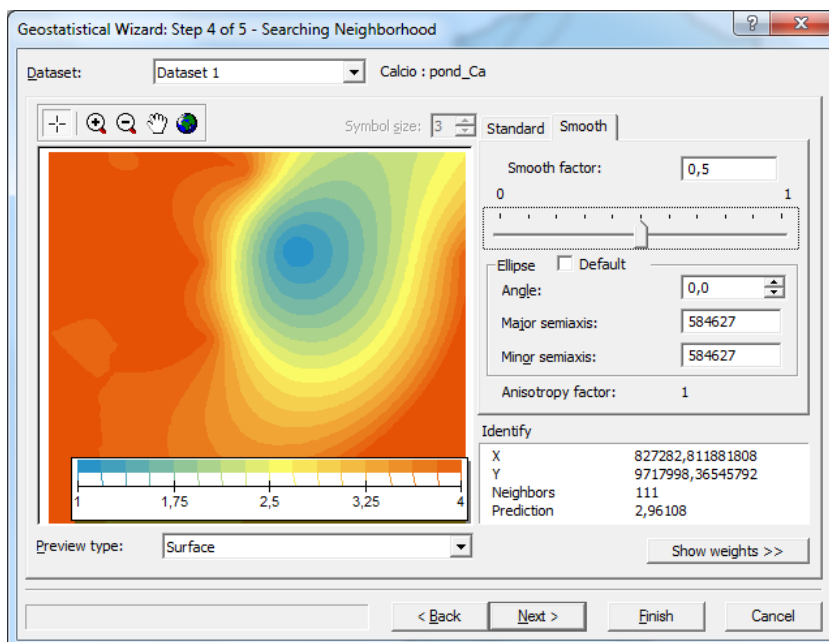


Figura 23. Cercanía de los puntos a la tendencia y modelación.

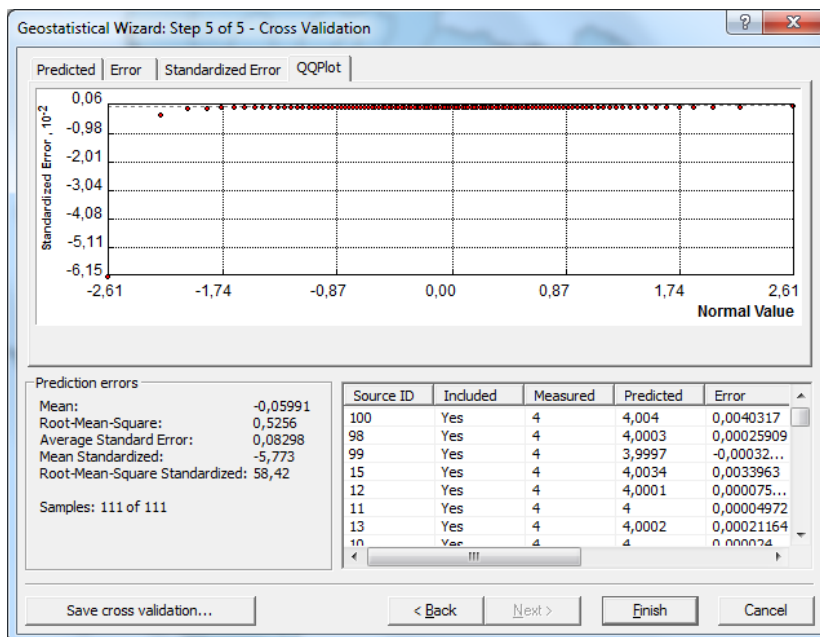


Figura 24. Modelación aplicando un modelo de suavidad de 0,5.

Para una mejor visión de la modelación realizamos un factor de suavidad, con esto se obtiene una interpretación de la interpolación más definida en colores.

d. Prueba, Comprobación y Selección

Al seguir los pasos anteriores se llega a concretar un tipo de modelación así por ejemplo se realizó para cada uno de las variables analizadas en el laboratorio, tal es el caso para macronutrientes, mesonutrientes, micronutrientes, potencial hidrógeno (pH), conductividad eléctrica _CE, Textura.

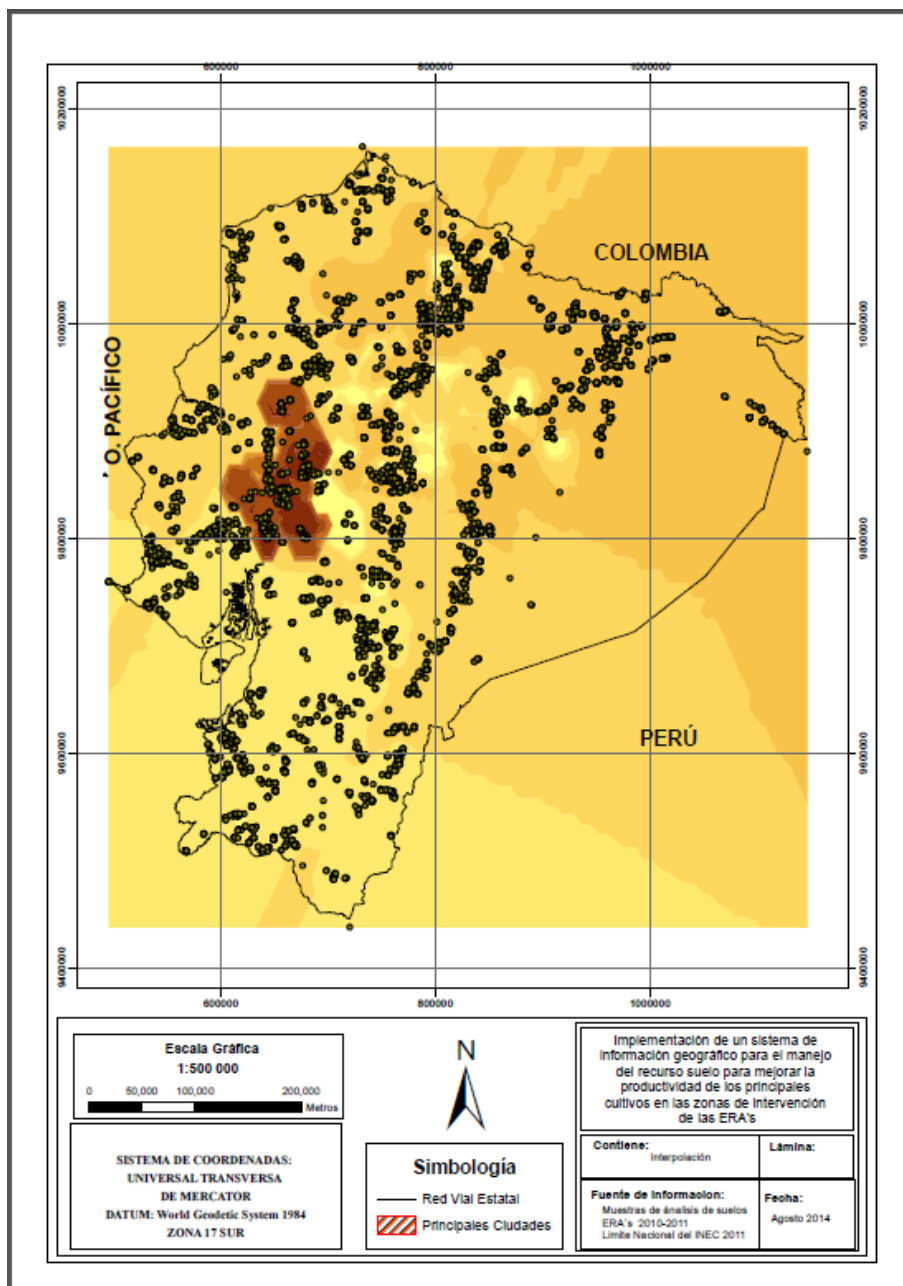


Figura 25. Modelo de interpolación para cada una de las variables, ejemplo para Nitrógeno.

Establecido el modelo de interpolación definimos los rangos alto, medio y bajo para la estructura de los polígonos para cada uno de los niveles establecidos, seguido de esto se estableció colores a manera de semaforización para poder diferenciar los rangos.

Después de definir la interpolación más adecuada, ajustada y validada con datos de otros proyectos se procedió a transformar el archivo raster a vector en entidad polígono con extensión shapefile (*.shp), mediante el siguiente paso: Clic derecho en el archivo

temporal ordinary kriging, Data, export vector, se selecciona la opción filledcontours y seleccionamos la carpeta donde vamos a guardar el archivo.

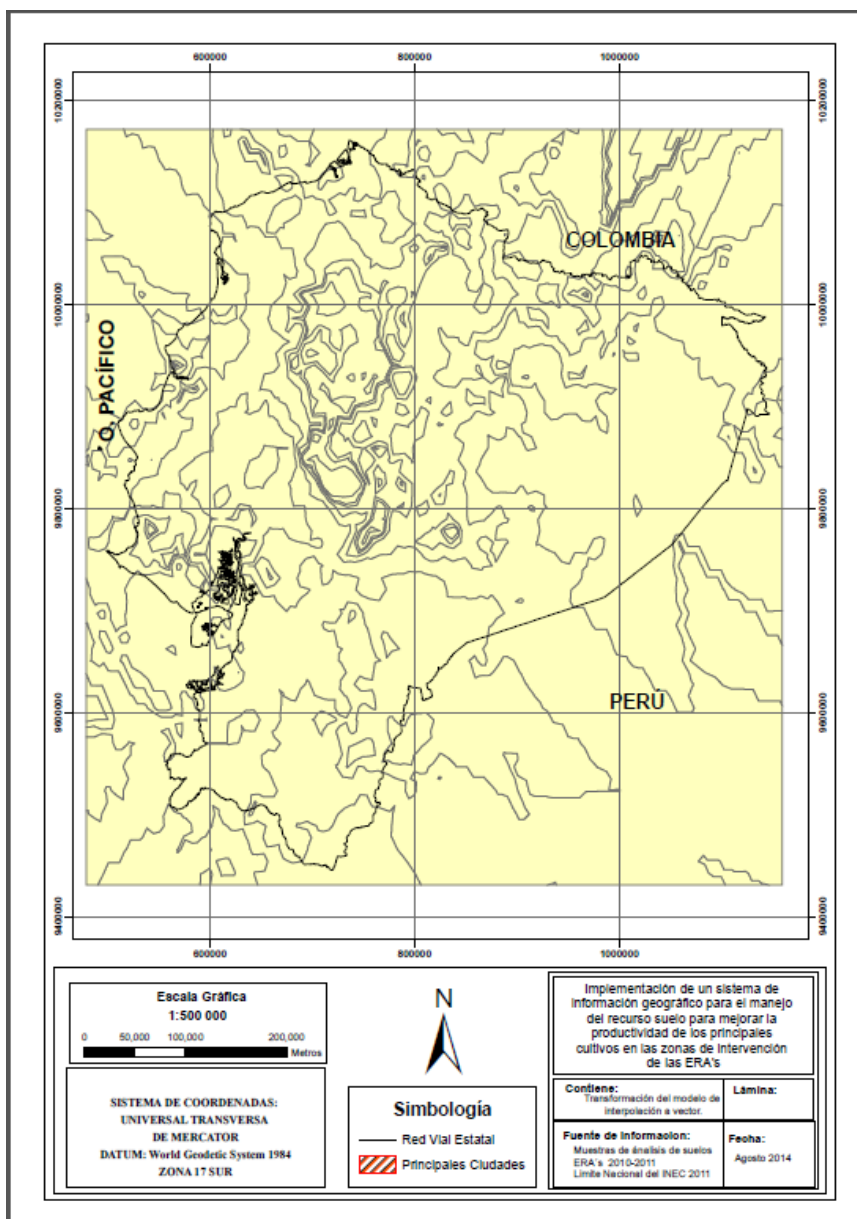


Figura 26. Transformación del modelo de interpolación a vector.

Ya convertido en un archivo vector shapefile, con la ayuda de la herramienta ArcToolbox de la firma ESRI ArcGis 9.3 y la opción Clip, se realiza el corte con el límite del Ecuador (Fuente INEC 2011), como se muestra en la Figura 27.

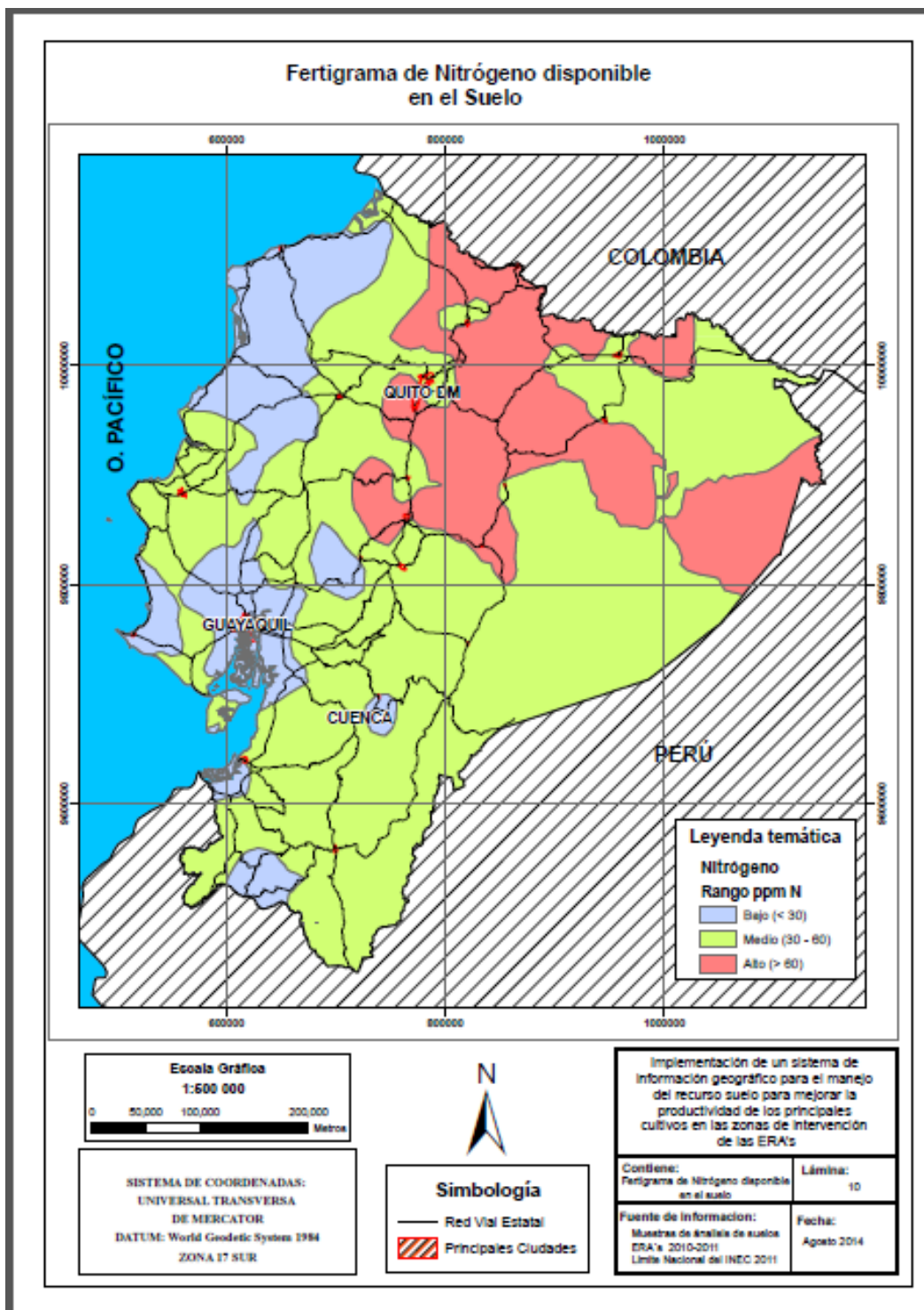


Figura 27. Modelo de Fertigrama para la variable Nitrógeno.

Cuadro 3. Tabla de atributos con la información edáfica

FID	Shape	TEXTURA	PROFUN	PEDREG	DRENAJE	N_FREATICO	First_ORDE	First_SUBO	GRANGRUP_2	cod_tex	cod_profun	cod_pedreg	cod_drenaj	cod_N_frea
26	Polygon	1	4	1	1	4	INCEPTISOL	VITRAND	UDIVITRAND	Gruesa	Profundo	Sin	Excesivo	Profundo
35	Polygon	1	4	1	1	4	INCEPTISOL	VITRAND	UDIVITRAND	Gruesa	Profundo	Sin	Excesivo	Profundo
238	Polygon	1	4	1	1	4	INCEPTISOL	VITRAND	UDIVITRAND	Gruesa	Profundo	Sin	Excesivo	Profundo
239	Polygon	1	4	1	1	4	INCEPTISOL	VITRAND	UDIVITRAND	Gruesa	Profundo	Sin	Excesivo	Profundo
271	Polygon	1	4	1	1	4	INCEPTISOL	VITRAND	UDIVITRAND	Gruesa	Profundo	Sin	Excesivo	Profundo
319	Polygon	1	4	1	1	4	ENTISOL	PSAMMENT	USTIPSAMMENT	Gruesa	Profundo	Sin	Excesivo	Profundo
322	Polygon	1	4	1	1	4	INCEPTISOL	VITRAND	UDIVITRAND	Gruesa	Profundo	Sin	Excesivo	Profundo
326	Polygon	1	4	1	1	4	INCEPTISOL	VITRAND	UDIVITRAND	Gruesa	Profundo	Sin	Excesivo	Profundo
327	Polygon	1	4	1	1	4	INCEPTISOL	VITRAND	UDIVITRAND	Gruesa	Profundo	Sin	Excesivo	Profundo
352	Polygon	1	4	1	1	4	INCEPTISOL	VITRAND	UDIVITRAND	Gruesa	Profundo	Sin	Excesivo	Profundo
355	Polygon	1	4	1	1	4	ENTISOL	PSAMMENT	USTIPSAMMENT	Gruesa	Profundo	Sin	Excesivo	Profundo
363	Polygon	1	4	1	1	4	ENTISOL	PSAMMENT	USTIPSAMMENT	Gruesa	Profundo	Sin	Excesivo	Profundo
368	Polygon	1	4	1	1	4	INCEPTISOL	VITRAND	UDIVITRAND	Gruesa	Profundo	Sin	Excesivo	Profundo
375	Polygon	1	4	1	1	4	INCEPTISOL	VITRAND	UDIVITRAND	Gruesa	Profundo	Sin	Excesivo	Profundo
377	Polygon	1	4	1	1	4	ENTISOL	PSAMMENT	USTIPSAMMENT	Gruesa	Profundo	Sin	Excesivo	Profundo
382	Polygon	1	4	1	1	4	INCEPTISOL	VITRAND	UDIVITRAND	Gruesa	Profundo	Sin	Excesivo	Profundo
392	Polygon	1	4	1	1	4	INCEPTISOL	VITRAND	UDIVITRAND	Gruesa	Profundo	Sin	Excesivo	Profundo
402	Polygon	1	4	1	1	4	INCEPTISOL	VITRAND	UDIVITRAND	Gruesa	Profundo	Sin	Excesivo	Profundo
405	Polygon	1	4	1	1	4	ENTISOL	PSAMMENT	USTIPSAMMENT	Gruesa	Profundo	Sin	Excesivo	Profundo
411	Polygon	1	4	1	1	4	ENTISOL	PSAMMENT	USTIPSAMMENT	Gruesa	Profundo	Sin	Excesivo	Profundo
414	Polygon	1	4	1	1	4	ENTISOL	PSAMMENT	USTIPSAMMENT	Gruesa	Profundo	Sin	Excesivo	Profundo
416	Polygon	1	4	1	1	4	INCEPTISOL	VITRAND	UDIVITRAND	Gruesa	Profundo	Sin	Excesivo	Profundo
423	Polygon	1	4	1	1	4	ENTISOL	PSAMMENT	USTIPSAMMENT	Gruesa	Profundo	Sin	Excesivo	Profundo
424	Polygon	1	4	1	1	4	ENTISOL	PSAMMENT	USTIPSAMMENT	Gruesa	Profundo	Sin	Excesivo	Profundo

Fuente: Consultora Agroprecisión

3.9. Interpretación y Mapeo de los Indicadores Químicos y Biológicos

Depuración de los análisis de suelos

Esta actividad consistió en eliminar campos que contienen los datos de código y ubicación pero no datos de nutrientes y luego se unificó las tablas de atributos.

Determinación de Rangos

Los rangos y los niveles de Interpretación fueron tomados de la información del laboratorio de suelos de INIAP, reconocidos por la Sociedad Ecuatoriana de la Ciencia del Suelo – SECS, Cuadro 4.

Cuadro 4. Rangos para materia orgánica identificando Sierra y Costa.

Interpretación (%)	Etiqueta
< 3.0	Bajo (Sierra)
3.0 – 5.0	Medio (Sierra)
> a 5.0	Alto (Sierra)
< 1 .0	Bajo (Costa)
1.0 – 2.0	Medio (Costa)
> a 2.0	Alto (Costa)

Fuente: INIAP. EESC. 2002

Cuadro 5. Rangos para Macronutrientes y Materia orgánica.

N	P	K
Nitrógeno	Fósforo	Potasio
ppm	ppm	meq/100ml
< 30	<10	< 0.2
30.0 – 60.0	10 – 20	0.2 – 0.38
> a 60.0	> 20	> 0.38

Fuente: INIAP. EESC. 2002.

Cuadro 6. Rangos para Mesonutrientes.

Ca	Mg	S
Calcio	Magnesio	Azufre
meq/100ml	meq/100ml	ppm
<2.0	< 0.5	<12.0
2.0 – 5.0	0.5 – 1.5	12.0 – 24.0
>5.0	> 1.5	> 24.0

Fuente: INIAP. EESC. 2002.

Cuadro 7. Rangos para Micronutrientes.

Fe	Cu	Zn	Mn	B
Hierro	Cobre	Zinc	Manganeso	Boro
ppm	ppm	ppm	ppm	Ppm
< 20.0	< 1.0	< 3.0	< 5.0	<1.0
20 – 40	1.0 – 4.0	3.0 – 7.0	5.0 – 15.0	1.0 – 2.0
> 40	> 4.0	> 7.0	> 15.0	4.0

Fuente: INIAP. EESC. 2002.

Para una mejor interpretación de los datos de cada uno de los nutrientes del suelo y con el fin de obtener una modelo de cada uno de estos se procedió a dar los siguientes rangos, así por ejemplo con el Nitrógeno.

Cuadro 8. Ejemplo de interpretación para los elementos.

N Rango (%)	Interpretación	Nivel
< 30	Bajo	1
30.0 – 60.0	Medio	2
> a 60.0	Alto	3

Fuente: INIAP. EESC. 2002.

Cuadro 9. Rangos para Potencial Hidrógeno (pH).

pH	Rango (%)	Interpretación	Nivel
Muy Ácido		<5	1
Acido		5.1 – 5.5	2
Ligeramente Acido		5.6 – 6.0	3
Prácticamente Neutro		6.1 –6.5	4
Ligeramente Alcalino		6.5 – 7.5	5
Medianamente Alcalino		7.6 - 80	6

Fuente: INIAP. EESC. 2002.

Cuadro 10. Rangos para Conductividad Eléctrica (CE).

CE	Rango (mmhos/cm)	Interpretación	Nivel
No Salino		<2.0	1
Ligeramente Salino		2.0 – 3.0	2
Salino		3.1 – 4.0	3
Muy Salino		4.1 – 8.0	4

Fuente: INIAP. EESC. 2002.

3.10. Mapa de fertilidad

El mapa de fertilidad se generó a partir de la información tabulada e interpolada de MAGAP-ERAS 2010 y 2011 con más de 9 000 muestras de análisis de suelos conteniendo de esta forma las variables físicas, químicas y biológicas.

Para poder establecer niveles de fertilidad se procedió a dar valores ponderados a todas las variables que contiene el mapa, donde las variables permiten evidenciar la capacidad y limitantes en los suelos, se han dado los valores más altos a las características físicas y

los nutrientes que pueden incrementar o reducir ampliamente la productividad, tomando en cuenta la ley de los mínimos de Von Liebig 1828.

El criterio para análisis de la fertilidad es siempre el cubrir las áreas con uso agropecuario, ya que al analizar toda el área nacional nos encontramos con áreas protegidas, zonas urbanas y otros. Por ello se eliminaron las áreas sensibles que están siendo protegidas por el Ministerio de Ambiente del Ecuador-MAE y se ha dejado de lado las áreas del Sistema Nacional de Áreas Protegidas-SNAP.

Cuadro 11. Ponderación por variable y valor total para calificación de fertilidad.

Elemento	Ponderación individual	Ponderación total
pH	18	42
CE	10	
MO	14	
N	6	30
P	6	
K	6	
Ca	4	
Mg	4	
S	4	
Zn	3	
Fe	3	16
Cu	3	
B	4	
Mn	3	
Textura	12	
Profundidad	5	5
Drenaje	5	5
Nivel Freático	5	5
Pedregosidad	5	5
Total puntos	120	120

Fuente: Consultora Agroprecisión

Cuadro 12. Valores ponderados asignados para cada nutriente calificado por rango de fertilidad.

	N	P	K	Ca	Mg	S	Zn	Fe	Cu	B	Mn
Alto	6	6	6	4	4	4	3	3	3	4	3
Medio	4	4	4	2	2	2	2	2	2	2	2
Bajo	2	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1

Fuente: Consultora Agroprecisión

Cuadro 13. Valores ponderados asignados para las variables Textura, pH, y CE para determinar el nivel de fertilidad.

Textura	Ponderación	pH	Ponderación	CE	Ponderación
Arenoso	2	<5	4	<2	10
Arenoso franco	4	5,1-5,5	9	2 - 3	6
Franco arenoso	10	5,6-6	14	3 - 4	2
Franco	12	6,1-6,5	18	4 - 8	0
Franco limoso	10	6,6-7,5	14		
Limoso	8	7,6-8	6		
Franco arcilloso	10				
Franco arenoso arcilloso	6				
Franco limoso arcilloso	5				
Arcilloso arenoso	5				
Arcilloso limoso	5				
Arcilloso	4				

Fuente: Consultora Agroprecisión

Los valores ponderados fueron determinados en base a información secundaria y con el criterio de expertos en el tema de suelos, que luego de varias consultas se tomó la decisión de dar los valores ponderados expresados en los cuadros anteriores.

Se tomó en consideración que el nivel más alto tenga la mayor puntuación dentro de la calificación del rango de ponderación establecido así por ejemplo para nitrógeno se le asignó 6 puntos de ponderación, de los cuales 6 puntos son para el nivel de

interpretación alto, 4 puntos para medio y 2 puntos para bajo. De esta manera se calificó para los demás macronutrientes, mesonutrientes y micronutrientes, las variables pH, CE y textura también se dio una calificación similar.

En el cuadro siguiente se puede observar la tabla de atributos con los valores ponderados para cada uno de los elementos.

Cuadro 14. Ejemplo de ponderación en la tabla de atributos para Nitrógeno disponible en el suelo.

Cod_N	Ran_ppm_N	Niveles_N	pond_N
1	< 10	Bajo	6
2	10 - 20	Medio	4
3	>20	Alto	2

Fuente: Consultora Agroprecisión.

Seguidamente de dar el valor de ponderación se procedió a sumar el valor de todas las variables y a totalizar para tener un valor en relación al 100 % y de esta manera establecer los valores de fertilidad de acuerdo a la puntuación que alcanzaron cada uno de las variables físicas, químicas y biológicas.

Luego de dar valores ponderados a cada una de las variables se procedió a realizar la sumatoria para cada polígono y de esta manera se establecieron los valores de fertilidad en relación a la puntuación total que obtuvo cada suma en sus variables físicas y químicas.

Cuadro 15. Ejemplo de sumatoria de algunos valores ponderados y asignación rangos de fertilidad.

pond_N	pond_P	pond_K	pond_MO	pond_CE	pond_todo	ran_fert
6	4	2	8	10	30	Bajo

Fuente: Consultora Agroprecisión

Cuadro 16. Ponderación en la tabla de atributos para cada una de las variables.

Rango_	Niveles_	pond_	Cod_	R_mmhos_	Niveles_	pond_	Cod_	Ran_ppm_	Niveles_	pon	Cod_	Ran_ppm	Niveles	pond_	Cod_	Ran_ppm	Niveles	pond_	Cod_	Ran_ppm_	Niveles_	pond_
pH	pH	pH	CE	CE	CE	CE	Mn	Mn	Mn	d	B	_B	_B	B	S	_S	_S	_S	Cu	Cu	Cu	Cu
< 5	muy ácido	4	1	< 2	no salino	10	3	> 15	alto	3	1	< 1	bajo	1	1	< 12	bajo	1	2	01-abr	medio	2
< 5	muy ácido	4	1	< 2	no salino	10	3	> 15	alto	3	1	< 1	bajo	1	1	< 12	bajo	1	2	01-abr	medio	2
< 5	muy ácido	4	1	< 2	no salino	10	3	> 15	alto	3	1	< 1	bajo	1	1	< 12	bajo	1	2	01-abr	medio	2
< 5	muy ácido	4	1	< 2	no salino	10	3	> 15	alto	3	1	< 1	bajo	1	1	< 12	bajo	1	2	01-abr	medio	2
< 5	muy ácido	4	1	< 2	no salino	10	3	> 15	alto	3	1	< 1	bajo	1	1	< 12	bajo	1	2	01-abr	medio	2
< 5	muy ácido	4	1	< 2	no salino	10	3	> 15	alto	3	1	< 1	bajo	1	1	< 12	bajo	1	2	01-abr	medio	2
< 5	muy ácido	4	1	< 2	no salino	10	3	> 15	alto	3	1	< 1	bajo	1	1	< 12	bajo	1	2	01-abr	medio	2
< 5	muy ácido	4	1	< 2	no salino	10	3	> 15	alto	3	1	< 1	bajo	1	1	< 12	bajo	1	2	01-abr	medio	2
< 5	muy ácido	4	1	< 2	no salino	10	3	> 15	alto	3	1	< 1	bajo	1	1	< 12	bajo	1	2	01-abr	medio	2
< 5	muy ácido	4	1	< 2	no salino	10	3	> 15	alto	3	1	< 1	bajo	1	1	< 12	bajo	1	2	01-abr	medio	2
< 5	muy ácido	4	1	< 2	no salino	10	3	> 15	alto	3	1	< 1	bajo	1	1	< 12	bajo	1	2	01-abr	medio	2
< 5	muy ácido	4	1	< 2	no salino	10	3	> 15	alto	3	1	< 1	bajo	1	1	< 12	bajo	1	2	01-abr	medio	2
< 5	muy ácido	4	1	< 2	no salino	10	3	> 15	alto	3	1	< 1	bajo	1	1	< 12	bajo	1	2	01-abr	medio	2
< 5	muy ácido	4	1	< 2	no salino	10	3	> 15	alto	3	1	< 1	bajo	1	1	< 12	bajo	1	2	01-abr	medio	2

Fuente: Consultora Agroprecisión

Para establecer el nivel de fertilidad final de acuerdo a la ponderación total es decir la sumatoria de cada uno de las variables químicas, físicas y biológicas se establecieron rangos finales de fertilidad asignados a valores cercanos a 100 puntos como se muestra en el cuadro 13.

Para definir el nivel de fertilidad se utilizó el siguiente cuadro, donde se asignó la calificación al nivel de fertilidad en base a un análisis de todas las características del entorno.

Cuadro 17. Rangos y nivel de fertilidad de la cobertura de fertilidad nacional.

Rango/Puntos	Nivel de fertilidad
51 - 59	Muy bajo
60 - 65	Bajo
66 - 76	Moderadamente Bajo
77 - 93	Medio
94 - 108	Alto

Fuente: Consultora Agroprecisión

Como se observa en el cuadro anterior la menor puntuación que se obtuvo fue de 51 puntos y la mayor puntuación fue 108, a estos valores se los reclasifico por nivel de fertilidad tomando como análisis información secundaria de capacidad de uso de las tierras y aptitud agrícola.

De este modo se llegó a concretar que el rango de ponderación establecida que ajusta en proximidad a la realidad de fertilidad de suelos en el territorio continental y sobretodo refleja la realidad de los datos de análisis de suelos proporcionados por las ERAS.

CAPÍTULO IV

4. RESULTADOS

Como se puede observar en el mapa de fertilidad el nivel medio cubre la mayor cantidad de la superficie del territorio continental con 59,272 %, en tanto que el nivel muy bajo es la que presenta menor porcentaje con 0,058 %, como se observa en el cuadro y la Figura 28.

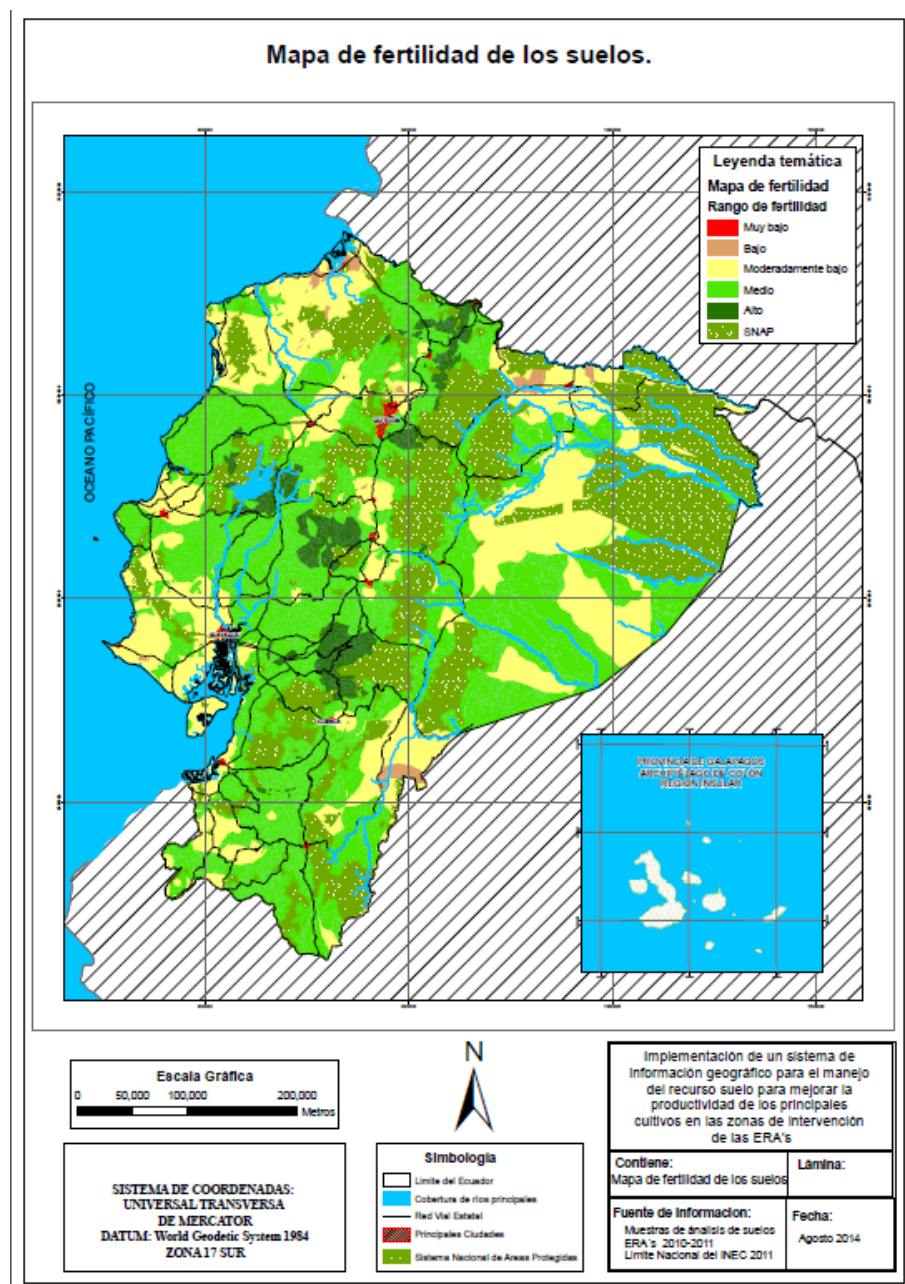
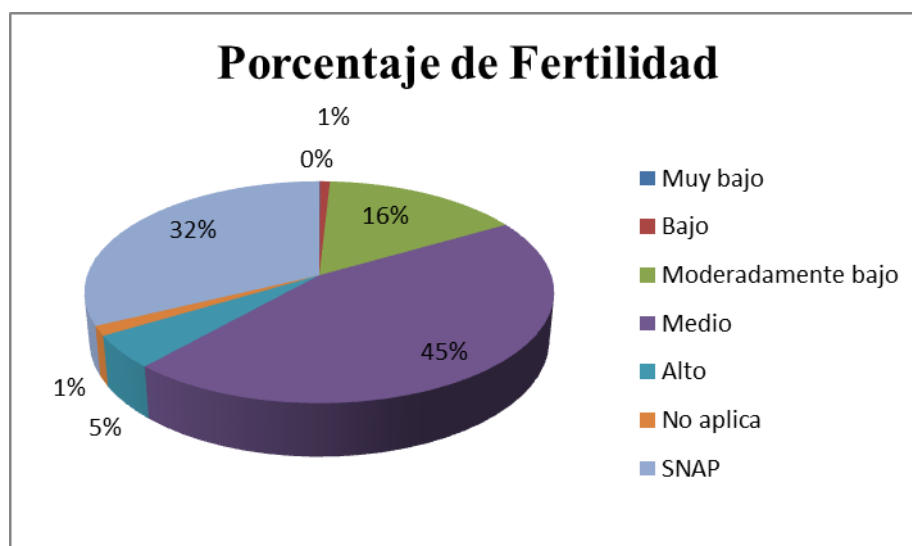


Figura 28. Mapa de fertilidad se los suelos del Ecuador

Cuadro 18. Porcentaje por Niveles de fertilidad para el Territorio continental.

Fertilidad	Porcentaje
Muy bajo	0,1
Bajo	2,1
Moderadamente bajo	41,1
Medio	117,1
Alto	12,5
No aplica	3,7
SNAP	83,8
TOTAL	100,0

Fuente: Consultora Agroprecisión

**Gráfico 1.** Porcentaje por Niveles de fertilidad para el Territorio Continental.

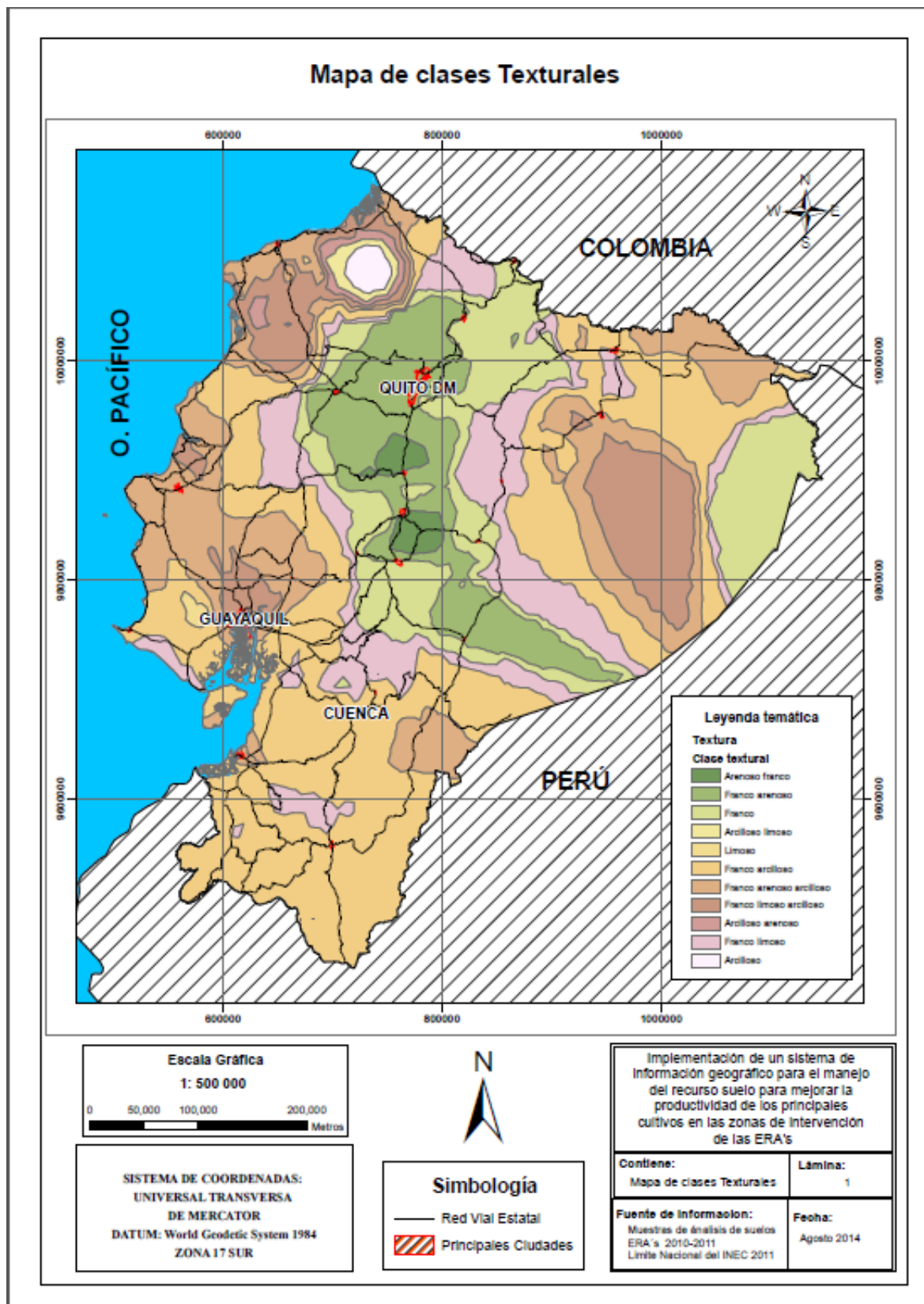


Figura 29. Mapa de Clases texturales

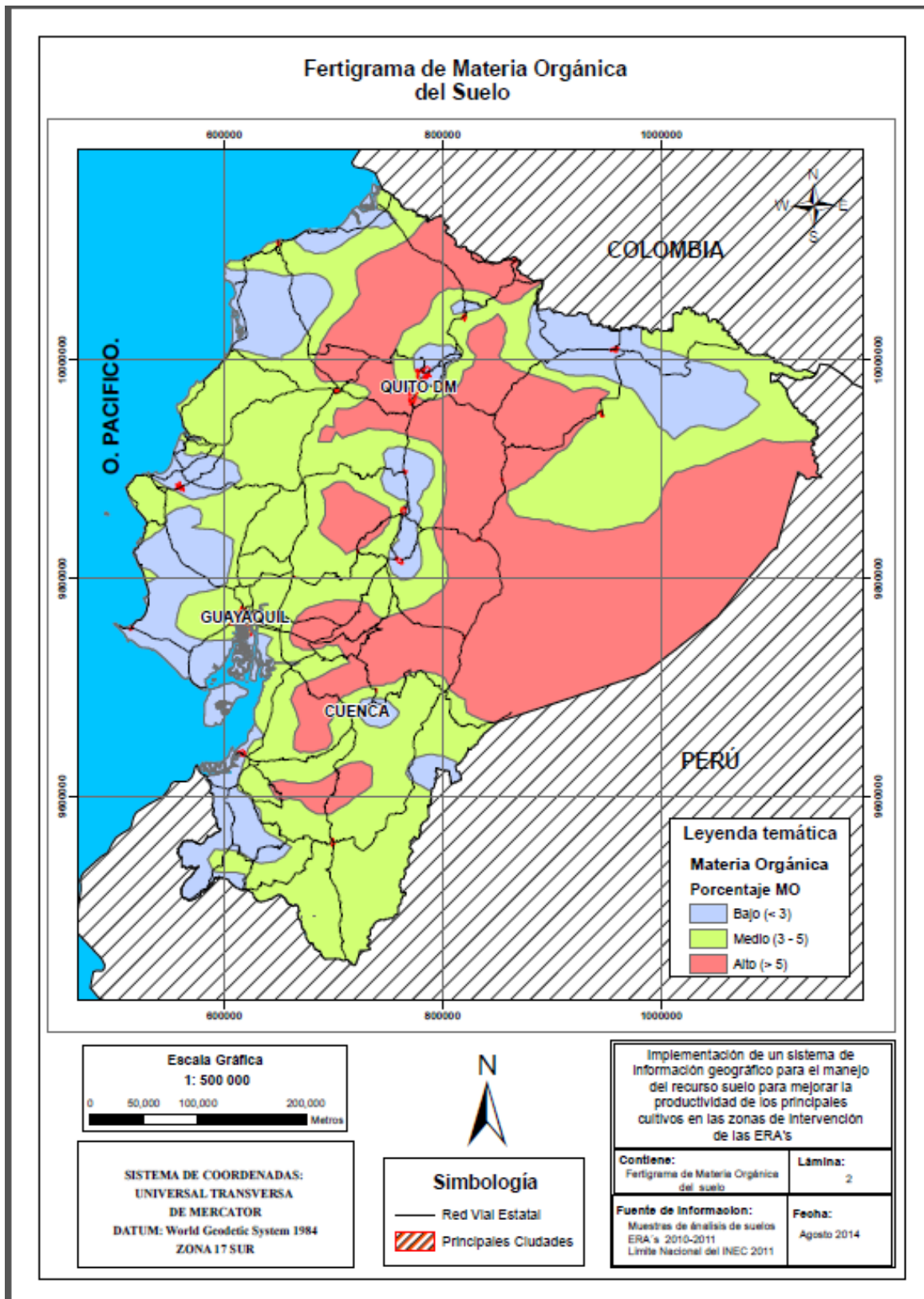


Figura 30. Mapa de Materia Orgánica

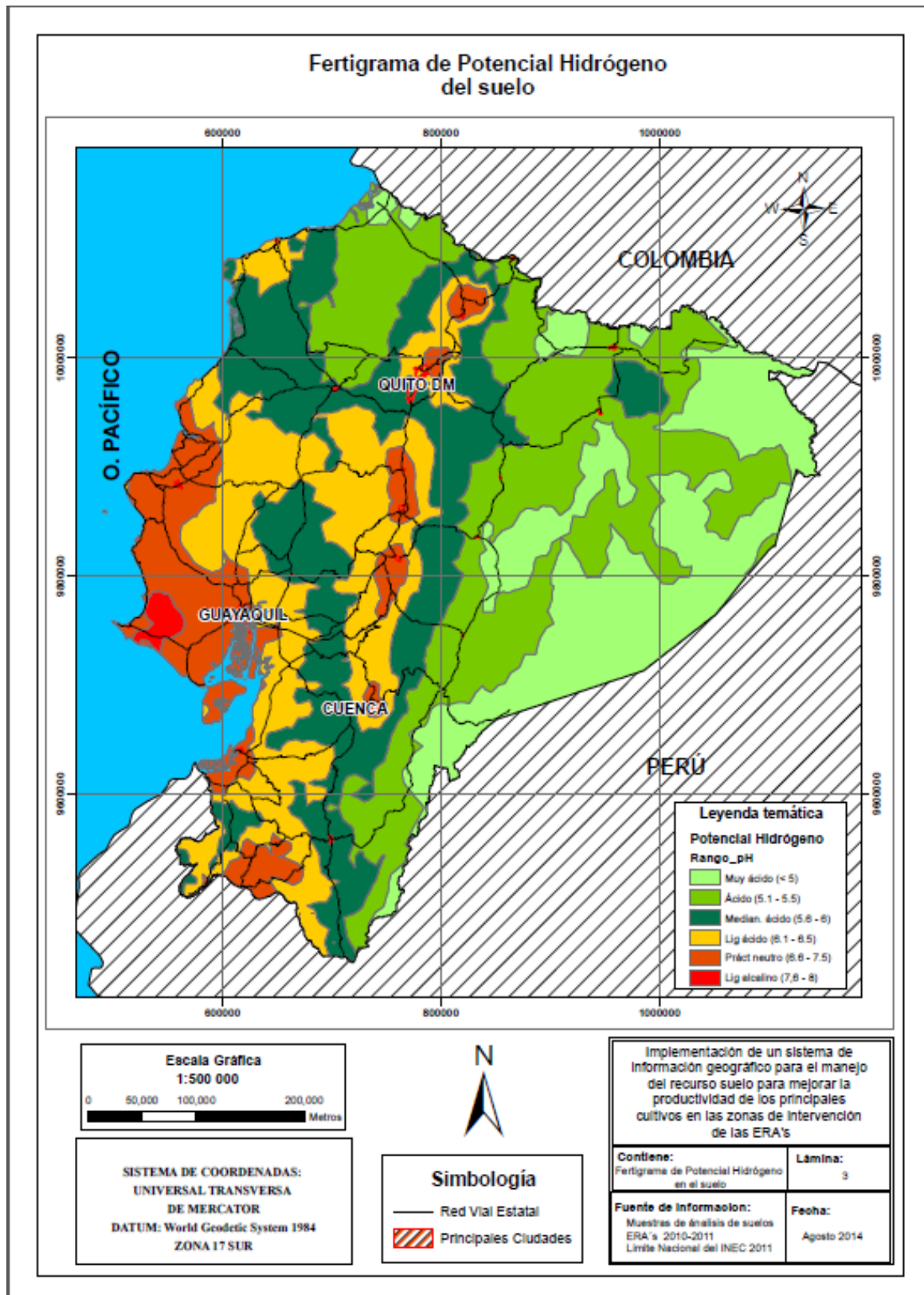


Figura 31. Mapa de pH

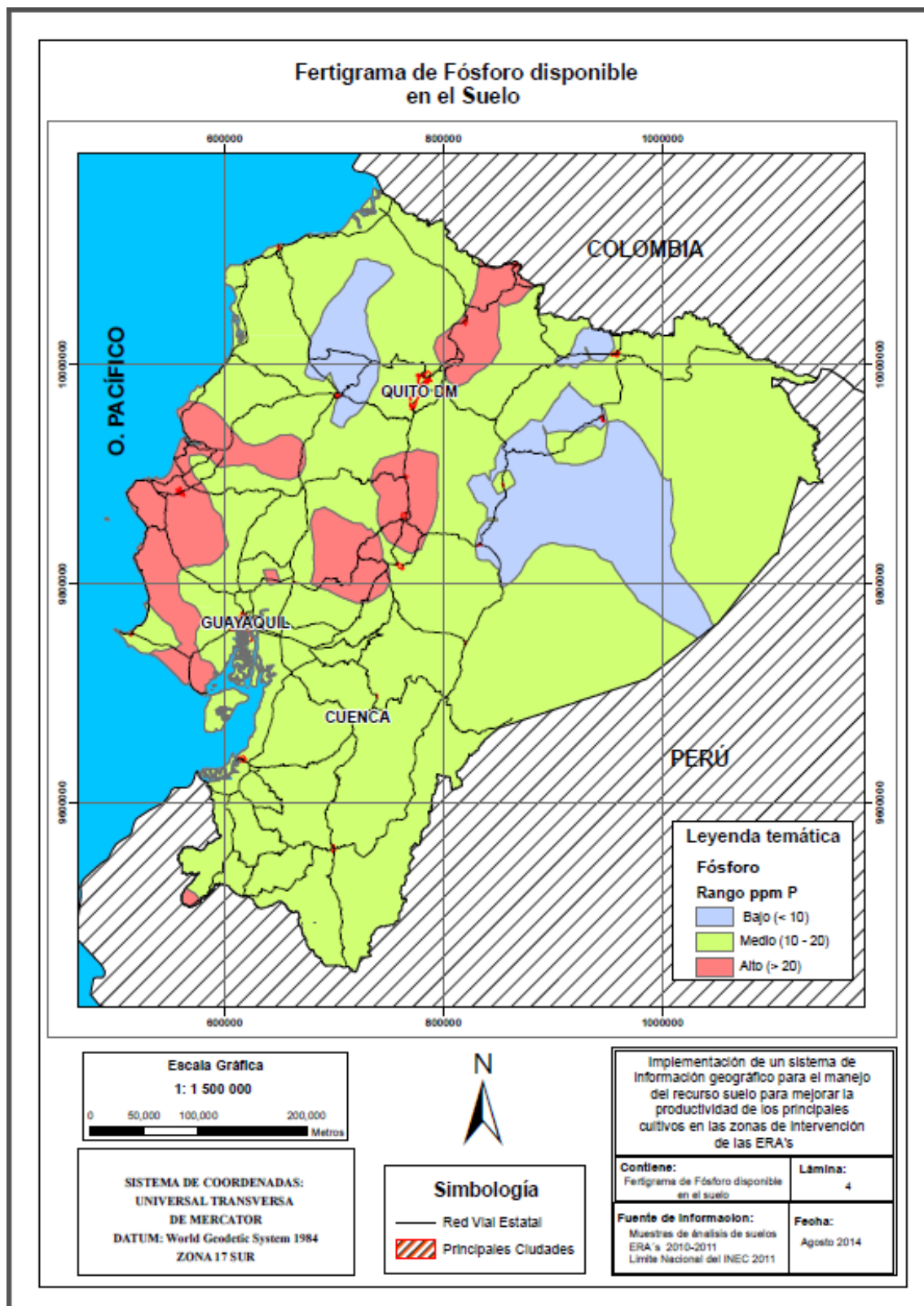


Figura 32. Mapa de pH

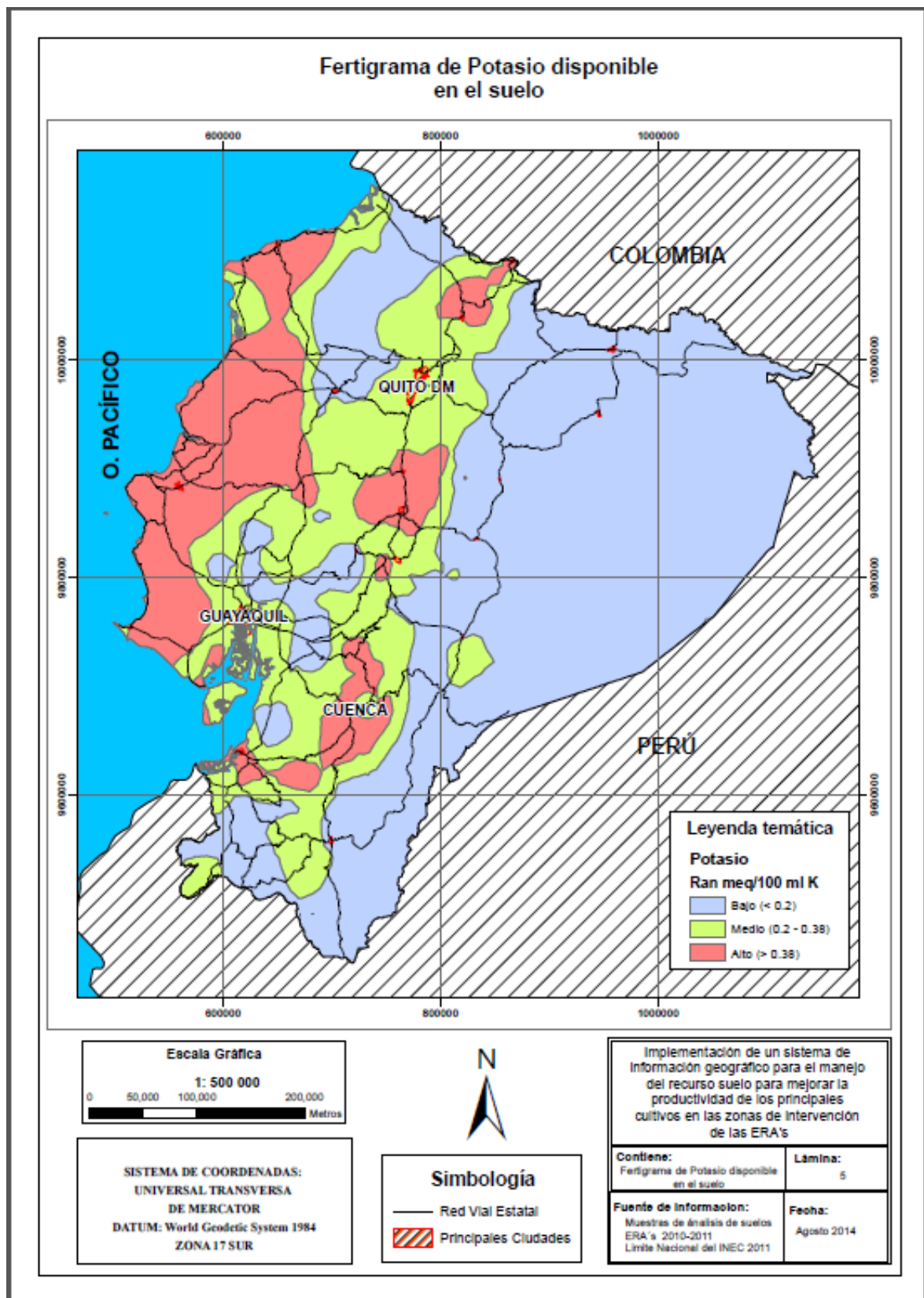


Figura 33. Mapa de Potasio

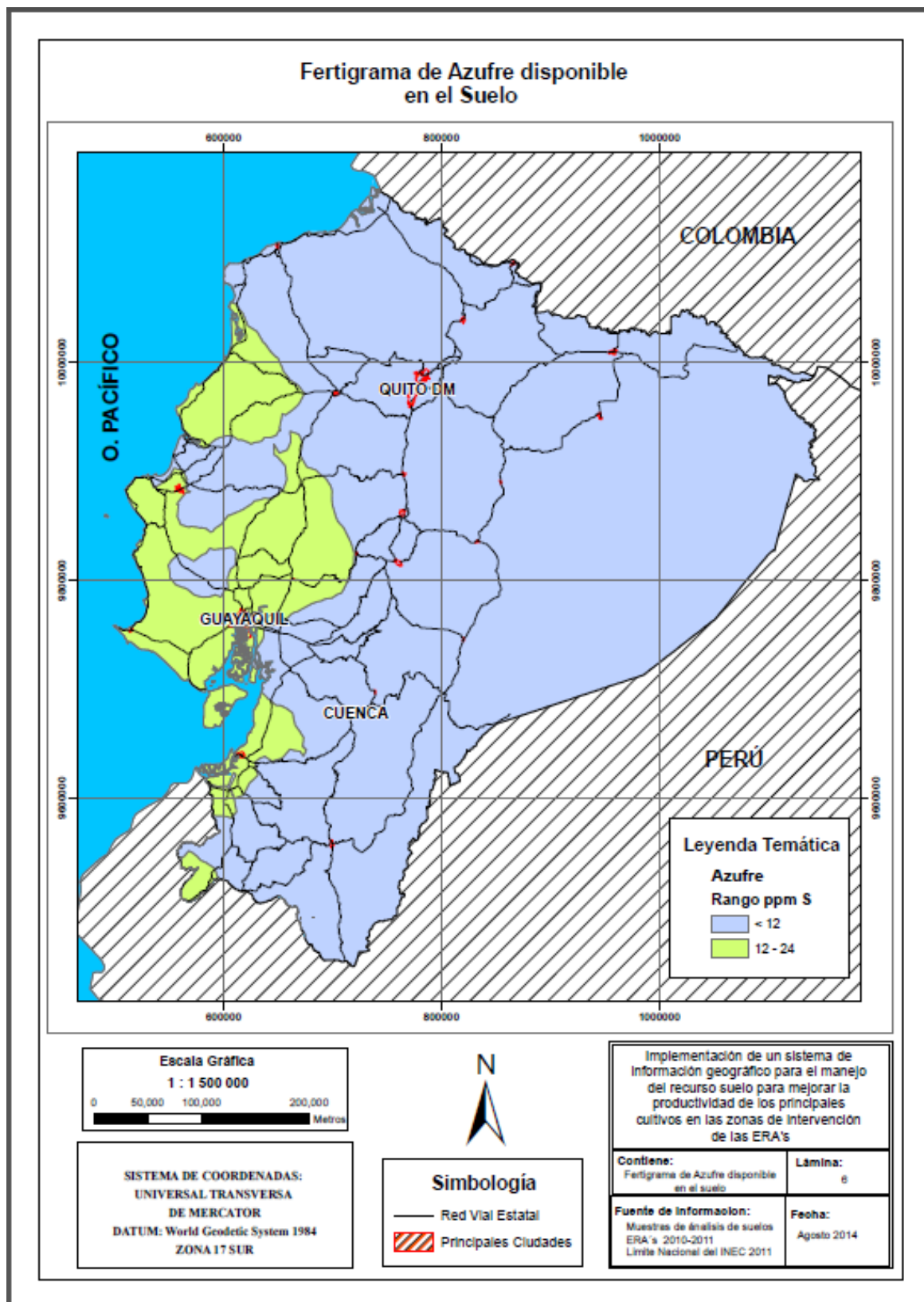


Figura 34. Mapa de Azufre

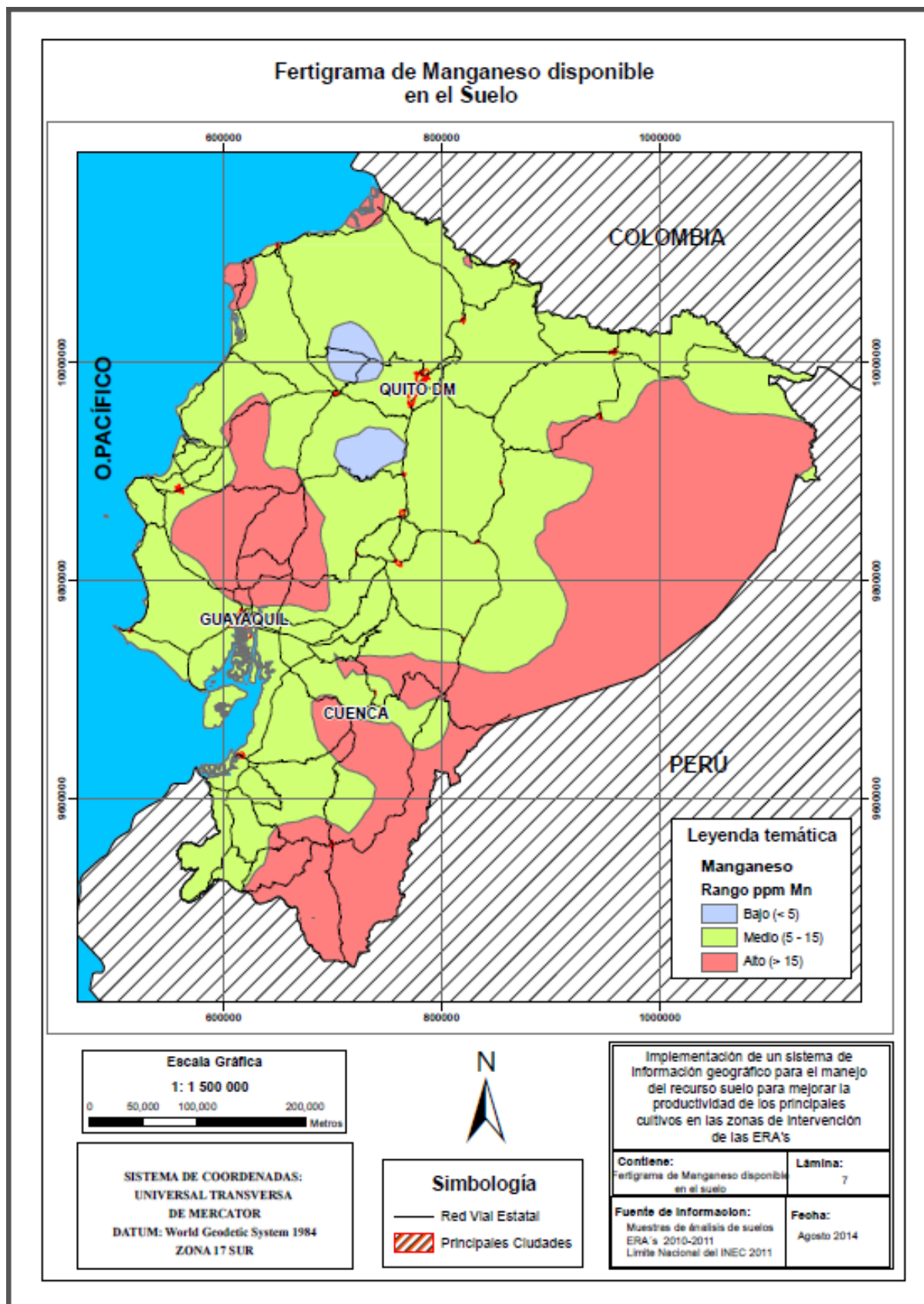


Figura 35.Mapa de Manganeso

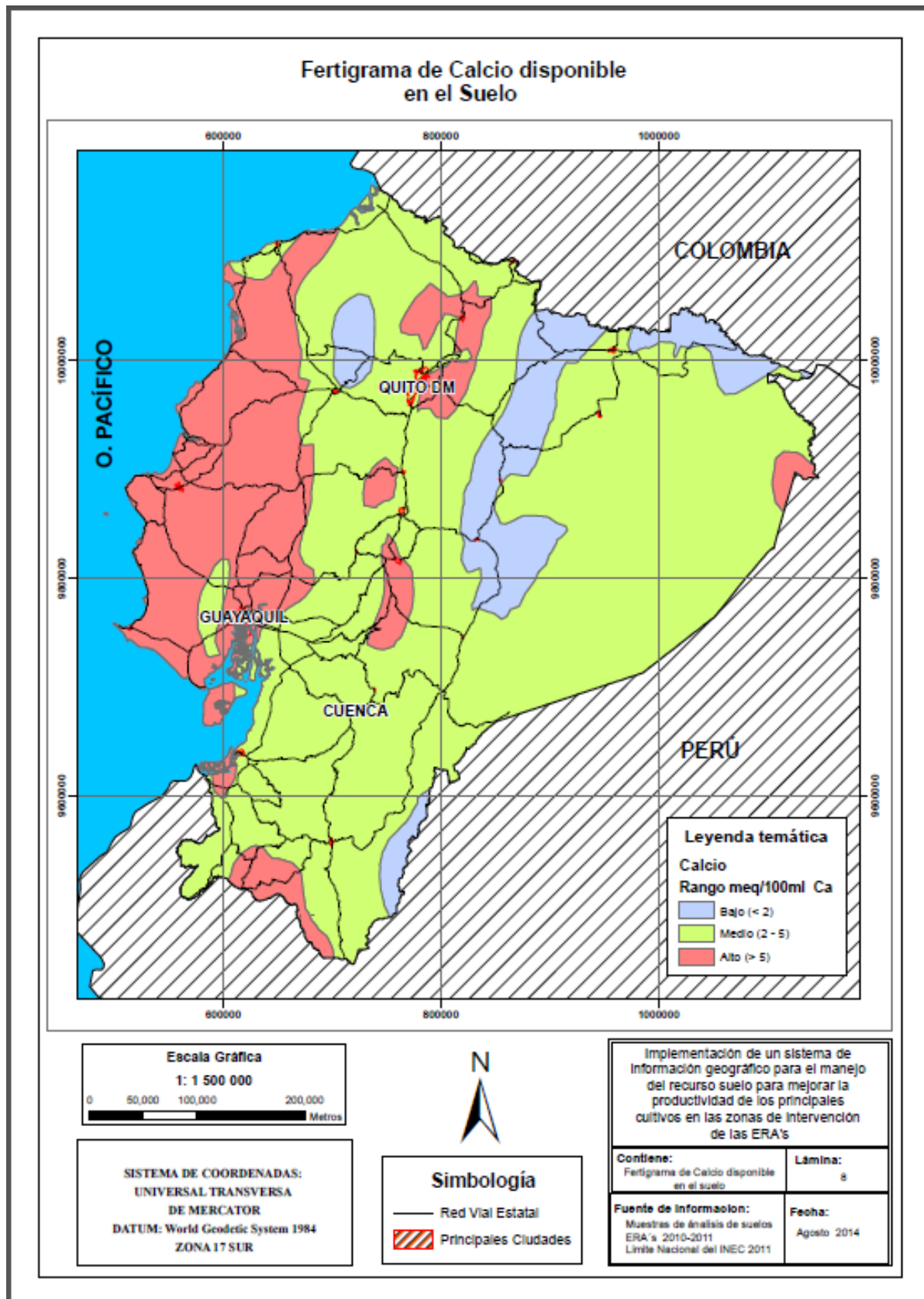


Figura 36. Mapa de Calcio

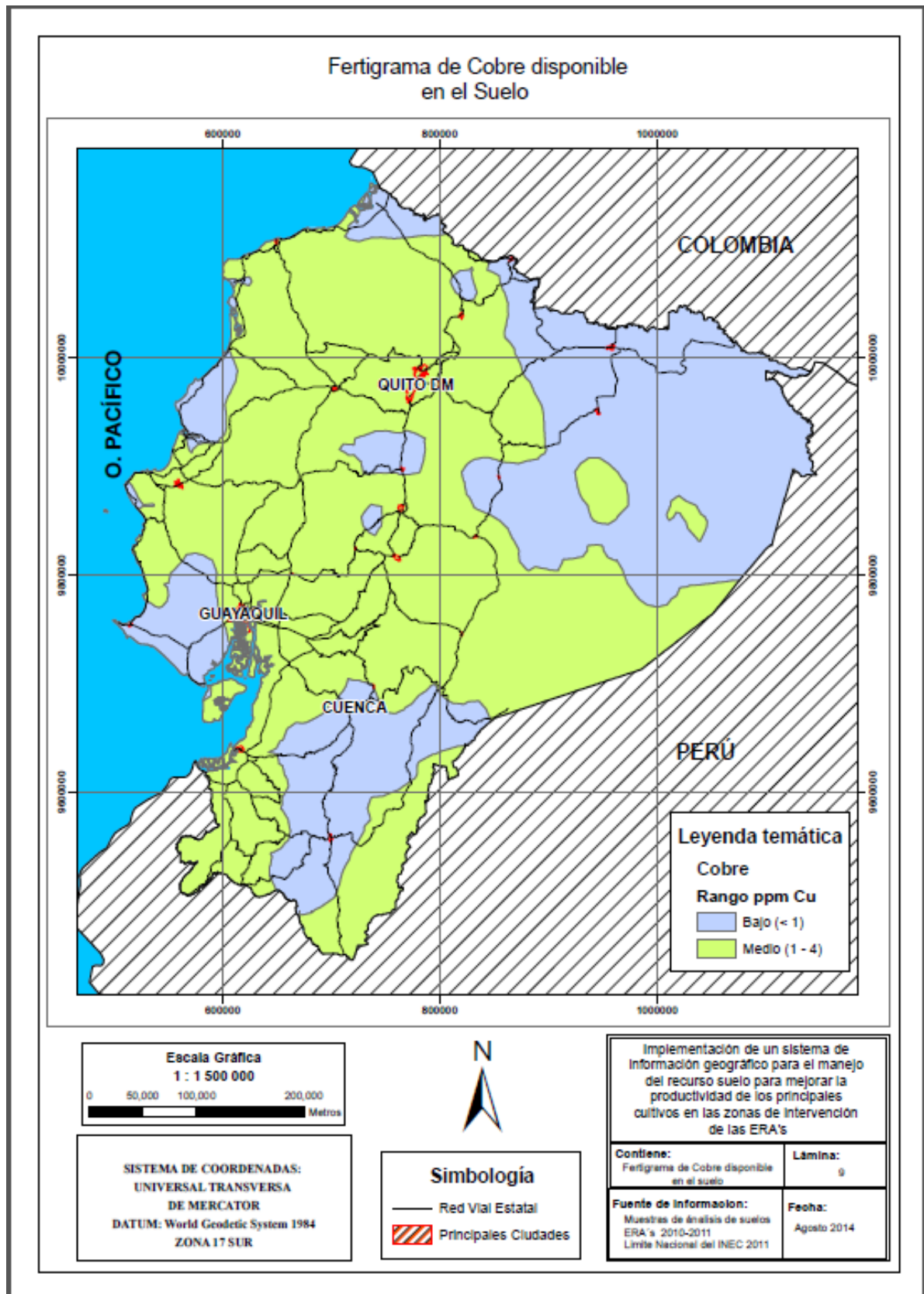


Figura 37. Mapa de Cobre

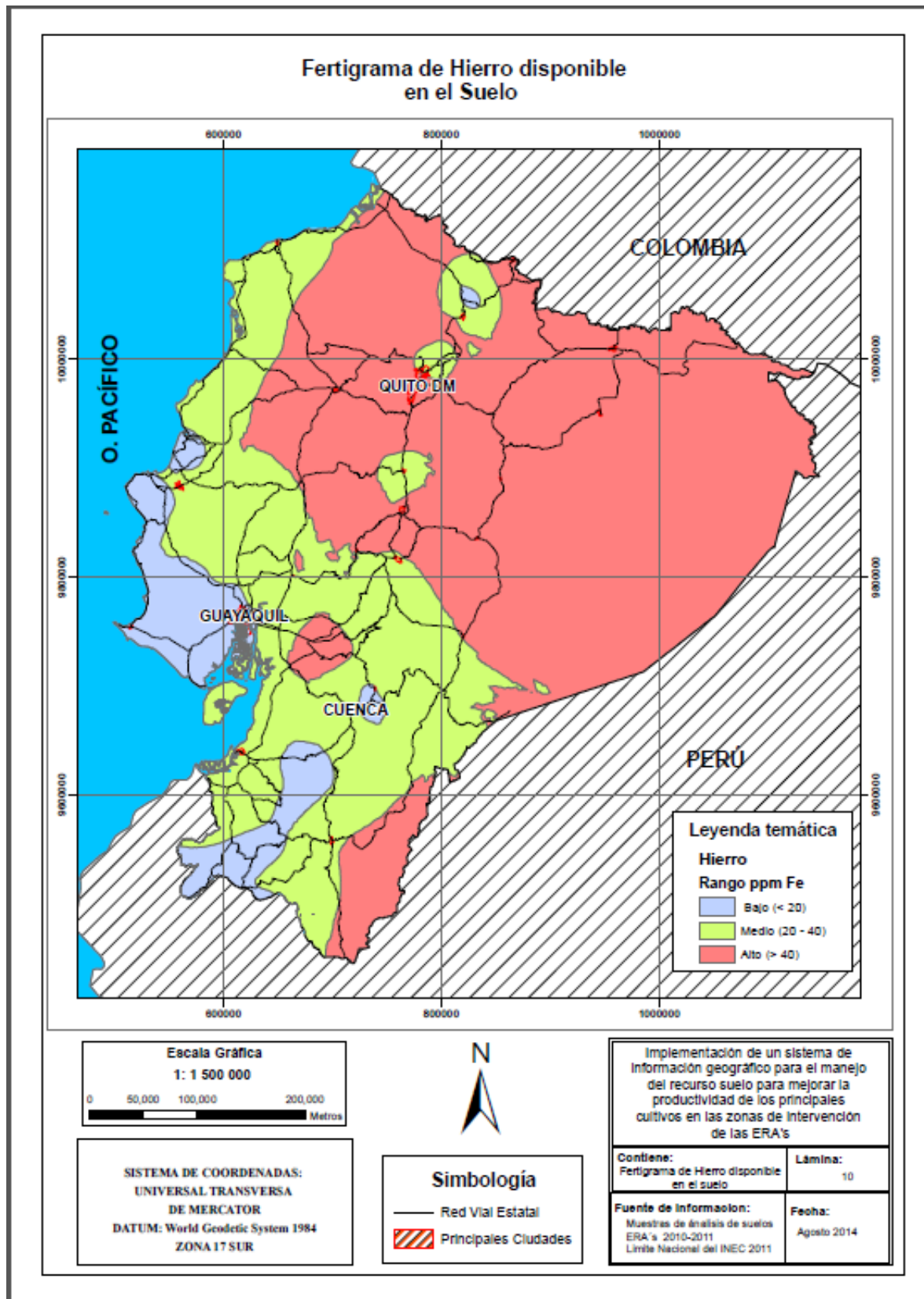


Figura 38.Mapa de Hierro

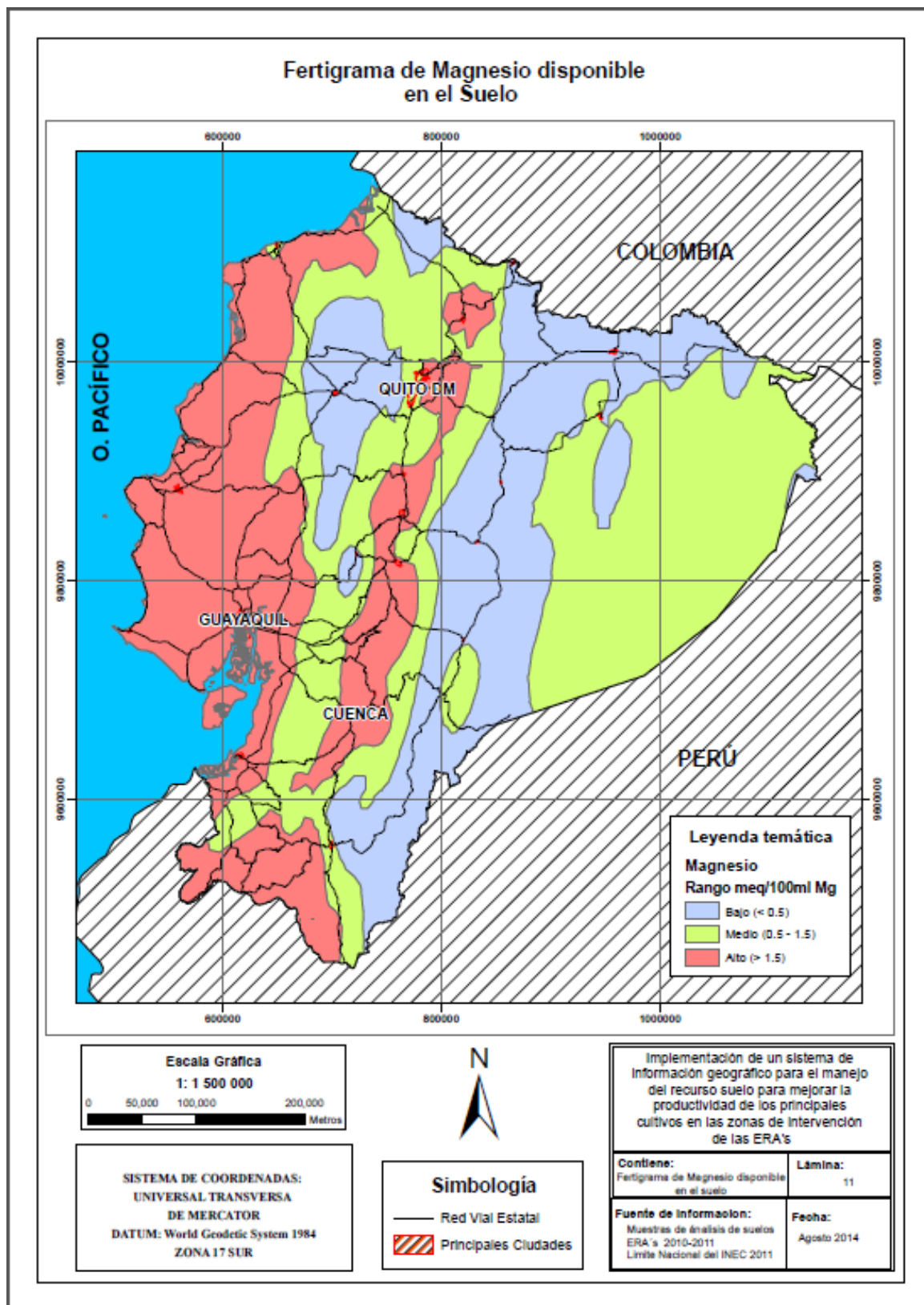


Figura 39. Mapa de Magnesio

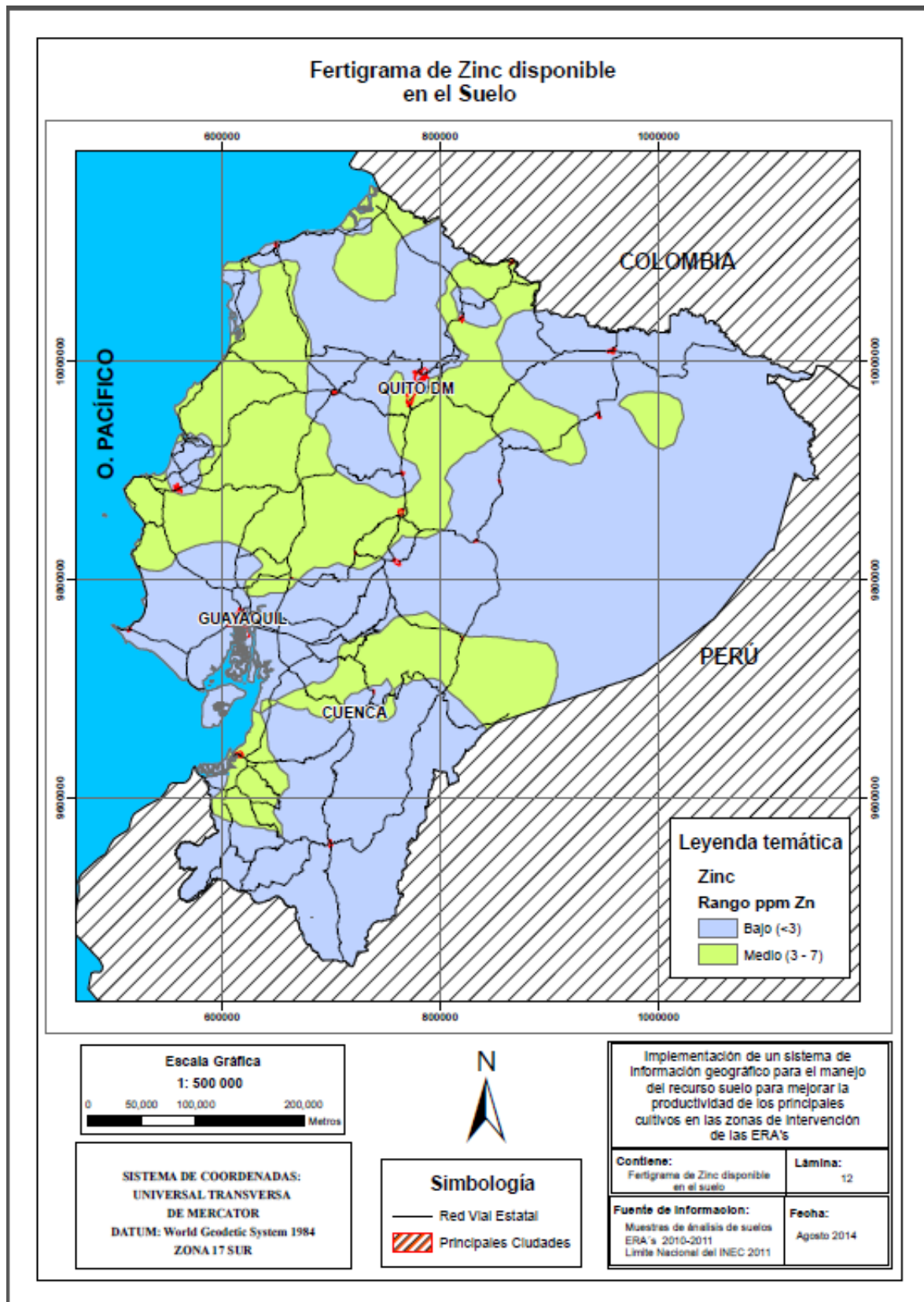


Figura 40. Mapa de Zinc

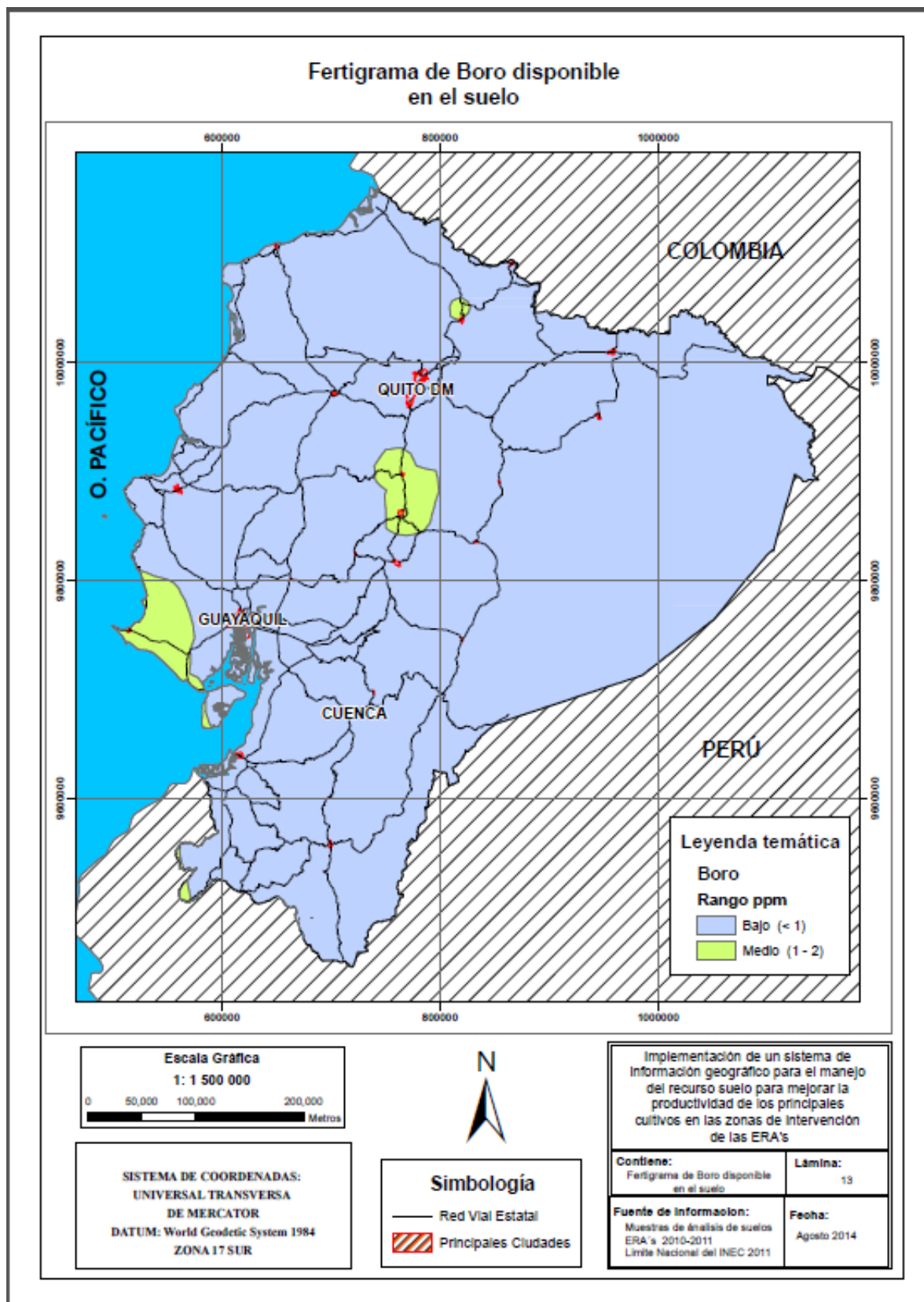


Figura 41. Mapa de Boro

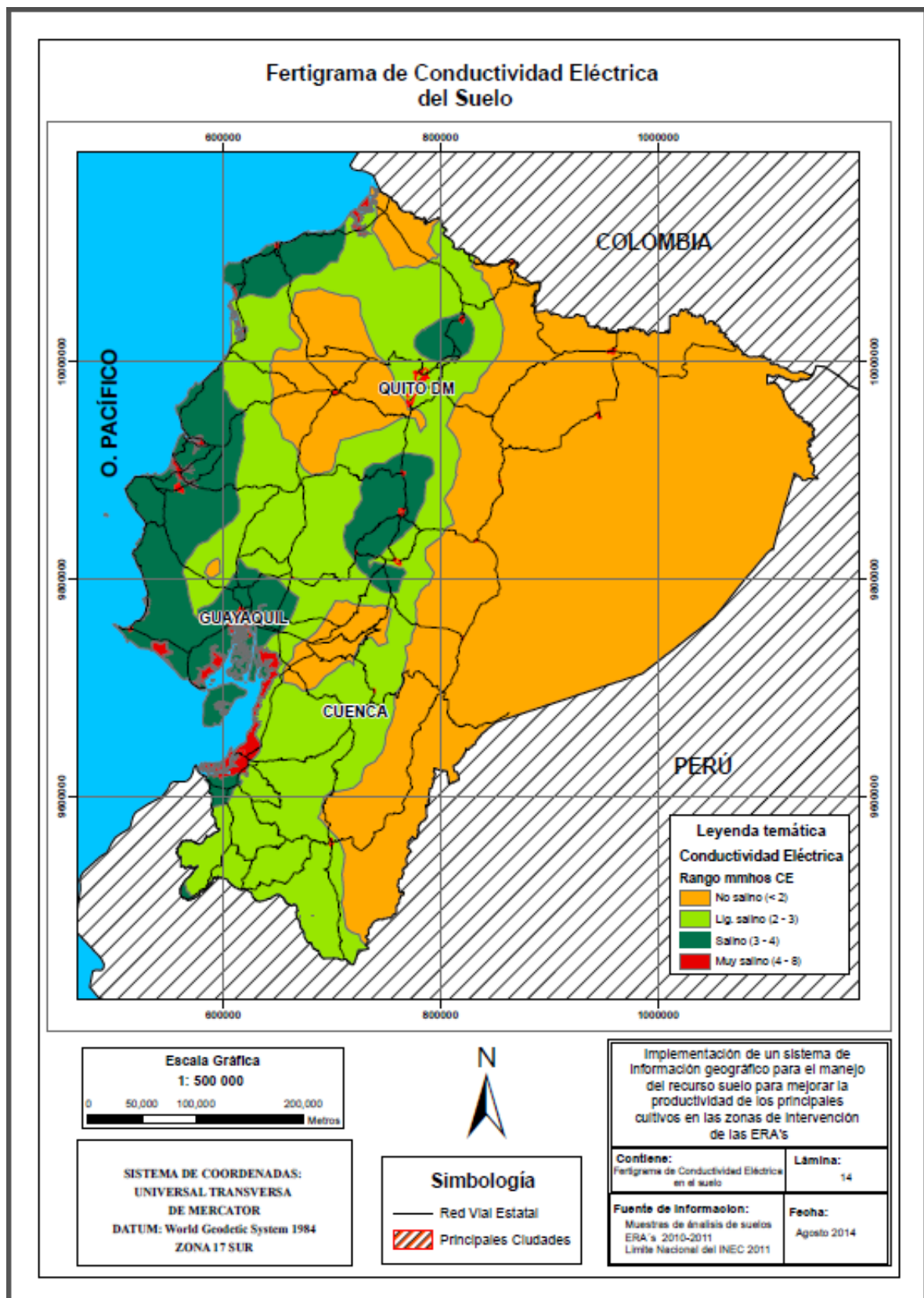


Figura 42. Mapa de Conductividad Eléctrica

Tabla Dinámica para la Fertilización de Cultivos

En cuanto se refiere a las recomendaciones de análisis de suelos se consideró un listado de cultivos que son representativos en la economía de país y que se encuentran dentro de las zonas de intervención de las ERAS.

Cuadro 19. Requerimientos nutricionales para los principales cultivos de la zona de intervención de las ERAS.

REQUERIMIENTO NUTRICIONAL DE LOS CULTIVOS (kg/ha)				
CULTIVO	N	P	K	Rendimiento
Arroz	96	14	98	4.0 Tm
Maíz duro	70	10	53	2.5 Tm
Maíz suave	74	17	21	5.0 Tm
Papa	90	11	130	15.0 Tm
Trigo	80	80	30	1.0 Tm
Frejol	76	100	150	2.0 Tm
Caña de azúcar	125	20	175	70.0 Tm
Banano	50	7,5	150	25.0 Tm
Café	30	3	40	1.0 Tm
Cacao	50	10,5	80	1.5 Tm
Col	200	40	250	10.0 Tm
Lechuga	40	10	70	10.0 Tm
Cebolla	40	7	29	10.0 Tm

Fuente: INIAP, Guía Técnica de Cultivos y otros boletines

Las recomendaciones de fertilización siempre están relacionadas a un rendimiento esperado, es por ello que los rendimientos que han sido tomados para el presente cuadro en base a los rendimientos promedios nacionales, ya que en la literatura se encontraron casos de altos niveles de fertilización para cumplir con grandes rendimientos, pero que para nuestro medio se hace inalcanzable y tampoco representan experiencias locales.

Se realizó un análisis de los requerimientos nutricionales para cada uno de los cultivos y se correlacionó con los niveles de interpretación de suelos. Todo esto en una hoja de cálculo dinámica donde permite seleccionar el cultivo y el nivel del nutriente en el suelo para calcular la recomendación de fertilización.

La información para micronutrientes es muy limitada en el país, puesto que la investigación en nuestro medio no paga para los análisis puntuales y a esto sumado que la variabilidad de las condiciones climáticas y edáficas en nuestro país son grandes, complica el poder hacer actualmente un análisis de las mismas.

Recomendación de Fertilización para Cultivos				
Cultivo	Kg / Ha			
	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	
Maíz Suave	74	17	21	
Rango	Bajo	Bajo	Alto	
Recomendación	88,8	20,4	16,8	

Cultivo	Kg / Ha		
	N	P ₂ O ₅	K ₂ O
Maíz Suave	74	17	21
Rango	Bajo	Bajo	Alto
Recomendación	88,8	20,4	16,8

Figura 43.Tabla de Excel dinámica con recomendación de fertilización de cultivos.

Esta tabla dinámica de cálculo permite seleccionar el cultivo y luego seleccionar el rango de fertilidad en el que se encuentra ubicado, con esas dos variables y se puede obtener una recomendación aproximada, misma que debe ser manejada con mucho cuidado, ya que el dato debe ser tomado en cuenta únicamente como un referente por cuanto la variabilidad del suelo es alta y los métodos de interpolación generalizan mucha información.

La cantidad de nutrientes que se debe aplicar a un cultivo depende no solamente del contenido de nutrientes en el suelo, sino también del nivel relativo de otros insumos utilizados en la producción tales como riego, herbicidas y fungicidas.

Insumos que son utilizados en niveles inferiores al óptimo necesario y que impiden el efecto completo de otros insumos son llamados **factores limitantes**.

Los agricultores utilizan fertilizantes porque a través de ellos pueden mejorar sus ingresos. Las relaciones entre la capacidad de los cultivos de responder a la aplicación de fertilizantes, el contenido de nutrientes en el suelo, la presencia o no de factores limitantes y los precios de mercado, evidencian las dificultades intrínsecas en la determinación de las cantidades óptimas de fertilizantes a ser utilizadas en cada caso.

Debido a esto, las cantidades de fertilizante a ser aplicadas son a menudo estimadas en base a observaciones de campo y experiencia previas.

Recomendaciones de Fertilización

La forma ideal de determinar recomendaciones de fertilización es a través de la utilización de resultados de análisis de suelo que han sido correlacionados con funciones de producción para cada cultivo, en cada región y bajo diferentes regímenes de manejo agronómico. Esta información es el producto de programas de investigación a largo plazo, lo cual no se ha realizado en el país.

Alternativamente, las recomendaciones aquí presentadas han sido preparadas considerando resultados experimentales conducidos en el pasado por diferentes instituciones, recomendaciones de casas comerciales y por observaciones de campo en fincas de productores, siempre considerando los resultados de los análisis de químicos de suelo.

La fuente principal de la información de requerimiento de los cultivos es el Instituto Nacional Autónomo de Investigaciones Agropecuarias-INIAP así como la interpretación de los niveles de disponibilidad del nutriente en el suelo.

Características de Productos recomendados para la fertilización

Los productos fertilizantes simples que se recomienda para las diferentes regiones del país son los siguientes: Urea, Nitrato de Amonio, Superfosfato Triple (SFT), Fosfato Diamónico (FDA) y Cloruro de Potasio (KCl).

Estos productos no son los que se pueden utilizar en todos estos cultivos, pero son los más recomendados por varias razones, incluyendo: facilidad de aplicación, disponibilidad en mercados nacionales e internacionales, precio por unidad de nutriente y flexibilidad en diseñar formas y métodos de aplicación.

Es muy común encontrar en el mercado, fertilizantes completos con formulaciones tales como 15-15-15 y 12-24-12, que a menudo son recomendados para utilizarse en granos básicos. Estos productos pueden ser adecuados para la fertilización de granos básicos, pero no dan la suficiente flexibilidad al productor para aplicar exactamente las dosis recomendadas o para fraccionar las aplicaciones en la forma recomendada. Por ejemplo, en el caso del arroz, siempre es preferible aplicar fósforo antes de la siembra e iniciar las aplicaciones del nitrógeno unos 15 a 30 días después de la germinación. Esto solo se puede lograr si se utiliza superfosfato triple (0-46-0) como fuente de fósforo y urea (46-0-0) como fuente de nitrógeno.

5. CONCLUSIONES

- Se establecieron indicadores químicos, físicos y biológicos, mediante la interpretación de resultados de laboratorio de 9.631 muestras de suelo.
- De los resultados obtenidos, se concluye que de las 9 300 muestras de análisis de suelos proporcionadas por las ERAS, se utilizaron 7 804 para la generación de los fertigramas, y mapa de fertilidad en cada una de las variables tanto químicas, físicas y biológicas, por cuanto el resto no contiene información de su ubicación geográfica.
- Con la ayuda del SIG y mediante modelos de interpolación y geoestadística se realizaron las coberturas para cada variable química, física y biológica determinada en laboratorio. Las coberturas se denominaron para este caso como “Fertigramas”, de esta manera se integró al mapa final de fertilidad.
- Con los indicadores físicos, químicos y biológicos se obtuvo el mapa de fertilidad del ecuador continental, en formato shapefile *.shp, esta cobertura temática contiene todas las variables analizadas así como los valores ponderados asignados en orden de importancia a cada variable. Se establecieron cinco rangos de fertilidad:
 - Muy bajo
 - Bajo
 - Moderadamente bajo
 - Medio
 - Alto
- En cuanto a las recomendaciones de fertilización se establecieron 13 cultivos de importancia económica del país y mediante arreglos matemáticos establecidos, se elaboró una hoja electrónica de cálculo formato MS Excel, la que permite calcular las recomendaciones para la fertilización de cultivos en cada una de las zonas del país, acogiéndose a las particularidades de clima, suelos y región geográfica.

6. RECOMENDACIONES

- Utilizar los resultados de este estudio con el fin de coadyuvar a la búsqueda de una mayor productividad y de un aprovechamiento sostenible del recurso suelo, en los lugares de intervención de las ERAS del Ministerio de Agricultura a nivel nacional.
- Utilizar el mapa de fertilidad, y propuesta de recomendación como referencial, ya que la fertilidad es una factorial complejo, puesto que está relacionado a cada cultivo y tipo de manejo que se le da al mismo.

7. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

1. CLIRSEN (Centro de Levantamientos Integrados de Recursos Naturales por Sensores Remotos); PRONAREG (Programa Nacional de Regionalización); INERHI (Instituto Nacional Ecuatoriano de Recursos Hídricos); DINAC (Dirección Nacional de Avalúos y Catastros); SECS (Sociedad Ecuatoriana de la Ciencia del Suelo); Universidad Central del Ecuador. (1990) *Manual para estudios de suelos*. Quito, Ecuador.
2. DINAREN-MAGAP (Dirección de información de recursos naturales renovables y ordenamiento rural); Memoria técnica de la cartografía e Información Social de Infraestructura Comunitaria de la Provincia de Carchi. (2002) Quito Ecuador. COLMET DAAGE F. y GONZALEZ. A., Suelos profundos de los andes de altura con minerales de arcilla de 14^a interestratificados y aluminio extraíble. Traducción de Fausto Maldonado. In Revista SECS. Quito, Ecuador.
3. Díaz- Francés, E. (1993) Introducción a Conceptos Básicos de Geoestadística. Memorias Seminario Estadística y Medio Ambiente. Centro de Investigación en Matemáticas, CIMAT. Guanajuato, México.
4. Fassberder H.W. (1975) Química de suelos con énfasis en los suelos de América latina. IICA. San José de Costa Rica.
5. García, N. (2009). Metodología Sistema de información geoestadístico. Dane 55, Colombia. 1 – 52 p.
6. Henao, R. (2005) Introducción a la geoestadística, Teoría y Aplicación. Universidad Nacional de Colombia. 5 – 42 p.
7. Ifiques, M. (1975) Fraccionamiento y fijación del fósforo inorgánico en algunos suelos del Ecuador y del Perú. En Revista SECS, Quito Ecuador.
8. INIAP (Instituto Nacional Autónomo de Investigaciones Agropecuarias, EC). (2008) Guía técnica de los cultivos, Manual 73. Preparado por Villavicencio A. y Vásquez W. Quito, Estación Experimental Santa Catalina. 60 p.
9. INIAP (Instituto Nacional Autónomo de Investigaciones Agropecuarias, EC). (2000) Metodologías de análisis físico químico de suelos, aguas y foliares. Preparado por S. Alvarado. Quito, Estación Experimental Santa Catalina, Laboratorio del Departamento de Manejo de Suelos y Aguas 60 p.

10. _____. (2006). Metodologías de: Química de suelos. Comp. Y. Cartagena. Quito, Estación Experimental Santa Catalina, Departamento de Manejo de Suelos y Aguas. 41 p.
11. _____. Metodologías de: Física de suelos. Comp. Y. Cartagena. Quito, Estación Experimental Santa Catalina, Departamento de Manejo de Suelos y Aguas. 51 p.
12. _____.(2008) Metodologías de: Física de suelos. Quito, Estación Experimental Santa Catalina, Departamento de Manejo de Suelos y Aguas. 94 p.
13. _____. (2009) Niveles para la Interpretación de análisis de suelos. Quito, Estación Experimental Santa Catalina, Laboratorio del Departamento de Manejo de Suelos y Aguas. (Hoja de interpretación oficial).
14. _____. (2009) Guía para la descripción de suelos. Trad. R. Vargas. 1 ed. Roma. 99 p.
15. López-Acevedo, M. y Poch, R. (2008) Introducción a la edafología: uso y protección del suelo. Madrid, ES, Ediciones Mundi-Prensa. p. 241.
16. López, A., y J. Espinosa. (1995) Manual de nutrición y fertilización del banano. INPOFOS. p. 43.
17. Fuentes, J. (2009) El suelo y los fertilizantes. 5 ed. Madrid, ES, Ministerio de Agricultura Pesca y Alimentación, Ediciones Mundi- Prensa. p. 133, 175 - 177.
18. Mejía,L.(1997) Mapa General de Clasificación de Capacidad-Fertilidad de los Suelos. Quito, Ecuador.
19. _____. Leyenda de los mapas morfopedológicos del Ecuador. Quito, PRONAREG. Esc. 1: 200 000. 1982.
20. Oliver, M. A.; Webster, R. (1990) Kriging: A method of interpolation for geographica information systems. En: Int. J. Geogr. Inf. Syst. 4. 410 p.
21. Pierre G. (1997) Geoestatistical of Natural resources evaluations. New – York, Oxfosd, Internet, Consultado el 10 de julio de 2012.

22. Padilla, W. (2007) Fertilización de suelos y nutrición vegetal. Cuarta edición. Quito, EC, Agrobiolab. 1 disco compacto.
23. Rodríguez, J. (2005) Congreso Nacional de Teledetección, Puerto de la Cruz. España Tenerife. 4-10 p, Internet, Consultado el 23 de Julio de 2012.
24. Samper, F. J., y Carrera, J. (1990) Geoestadística. Aplicaciones a la Hidrogeología Subterránea. Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería. Universidad Politécnica de Catalunya. Barcelona. 200 p.
25. Soil Sourvey Staff. (Claves para la taxonomía de suelos). (2006) Trad. S. Ortiz y Ma. del C. Gutiérrez. 1 ed. en español. Departamento de Agricultura de los Estados Unidos, Servicio de Conservación de Recursos Naturales. 1 p.
26. UNAM, (2004) Universidad Nacional Autónoma de México-Universidad Autónoma de Yucatán, Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología.pp.
27. Yudego, C. y Siabato, W. (2004) Geoestadística y Medio Ambiente. Murcia.p.11-26. Recuperado de <http://bddoc.csis.es:8080/detalles.html>.
28. _____. Soil survey manual. Soil Conservation Service. U.S. Department of Agriculture Handbook 18. Internet. www.soils.usda.gov/technical/manual. 1993. p. 24.
29. Dobos, E., Carré, F., Hengl, T., Reuter, H.I., Tóth, G., (2006) Digital Soil Mapping as a support to production of functional maps. EUR 22123 EN, 68 pp.Office for Official Publications of the European Communities, Luxemburg.
30. Nide, (2001). Geoestadística aplicada a estudios de contaminación ambiental. Recuperado <http://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/reviving/article/viewFile/2815/4088>.
31. Lagacherie, P., McBratney, A. B., Voltz, M., ed. (2006). Digital soil mapping: an introductory perspective. Amsterdam: Elsevier. p. 600. ISBN 978-0-444-529589.
32. Scull, P.; J. Franklin, O.A. Chadwick & D. McArthur (June 2003). "Predictive soil mapping - a review". Progress in Physical Geography (Sage Publications) 27 (2): 171–197. doi:10.1191/0309133303pp366ra.
33. McBratney, A.B.; M.L. Mendonça Santos, B. Minasny (1 November 2003). "On digital soil mapping". Geoderma (Elsevier B.V., Amsterdam) 117 (1–2): 3–52. doi:10.1016/S0016-7061(03)00223-4

ANEXO 1

BOLETINES Y FICHAS INFORMATIVAS PARA EL MUESTREO DE SUELOS



Ministerio de
Agricultura, Ganadería,
Acuicultura y Pesca



Escuelas de la Revolución Agraria

MINISTERIO DE AGRICULTURA, GANADERIA, ACUACULTURA Y PESCA

SUBSECRETARIA DE FOMENTO AGRICOLA

SUBSECRETARIA DE FOMENTO GANADERO

**INSTITUTO NACIONAL DE CAPACITACION CAMPESINA
(INCCA)**

BOLETIN-ERA Nº 3



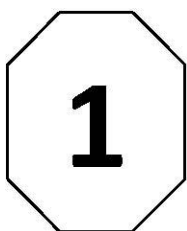
**INSTRUCTIVOS DE CAMPO PARA FACILITADORES/AS DE LAS
ESCUELAS DE LA REVOLUCIÓN AGRARIA (ERA´s)**

**Elaboración:
Coordinación ERAs**

AGOSTO 2010

CONTENIDO

1	INSTRUCTIVO PARA LA TOMA DE MUESTRAS DE SUELO EN LAS ORGANIZACIONES DE PRODUCTORES/AS DE LAS ESCUELAS DE LA REVOLUCION AGRARIA –ERA–.....	1
	ANEXO 1 Distribución de muestras de suelo a nivel nacional en las Escuelas de la Revolución Agraria -ERA-.....	6
	ANEXO 2 Ficha metodológica para la toma participativa de muestras de suelo con productores/as	7
	ANEXO 3 Ficha técnica para la toma de muestras de suelo a nivel nacional en las Escuelas de la Revolución Agraria -ERA-.....	9
	ANEXO 4 Formulario de identificación de la muestra de suelos	12
	ANEXO 5 Códigos de las muestras de suelo a nivel nacional en las Escuelas de la Revolución Agraria -ERA-.....	13
	ANEXO 6 Formulario de entrega recepción de muestras en la Dirección provincial	14



**INSTRUCTIVO PARA LA TOMA DE MUESTRAS DE SUELO EN
LAS ORGANIZACIONES DE PRODUCTORES/AS DE LAS
ESCUELAS DE LA REVOLUCION AGRARIA –ERA–**

Para cada una de las organizaciones participantes en las Escuelas de la Revolución Agraria ERA, se ha destinado un número total de OCHO (8) muestras de suelo para su respectivo análisis físico químico, los mismos que se ejecutarán conforme a una planificación presentada por cada Dirección Provincial. Únicamente en el caso de Galápagos se considerará un número

de CINCO

(5) muestras por ERA.

Dentro de las OCHO muestras, se considera el muestreo de la parcela de aprendizaje a implementarse en la Escuela de la Revolución Agraria ERA. Las restantes muestras deberán ser sorteadas de entre los productores/as asistentes a la ERA, considerando también la posibilidad de cubrir zonas representativas de la comunidad y las fincas de los productores/as.

Cada facilitador será responsable de la toma “participativa” de las muestras en cada una de las organizaciones de productores/as a su cargo. Las muestras deberán ser entregadas al coordinador provincial conforme a la planificación presentada.

El coordinador provincial será el responsable del envío semanal de las muestras hacia el laboratorio de INIAP, conforme a su ubicación y designación correspondiente. Los laboratorios de INIAP habilitados para el análisis de suelos son:

En el Anexo 1, se detalla la distribución de las provincias y muestras hacia los laboratorios habilitados para el respectivo envío y análisis. Las muestras deben ser entregadas los días jueves en

Estación Experimental de INIAP	DIRECCION
Estación Experimental Santa Catalina	Pichincha -Quito, Sector Cutuglagua Km. 4 Vía Quito – Alóag.
Estación Experimental Pichilingue	Los Ríos – Quevedo, Km. 5 Vía Quevedo – El Empalme.
Estación Experimental Litoral Sur	Guayas – Yaguachi, Km. 26 Vía Durán -Tambo

la mañana en cada una de las semanas programadas. El costo del envío deberá ser asumido por las Direcciones Provinciales.

Los resultados de los análisis serán enviados a la Subsecretaría de Fomento Agrícola y canalizados hacia las Direcciones Provinciales a través de los Coordinadores Regionales del SITPA ERA, para la respectiva entrega a las organizaciones por parte de los facilitadores de las Escuelas de la Revolución Agraria ERA.

Adjunto al presente instructivo se envía una ficha metodológica para tomar la muestra de suelo de forma participativa con la organización de productores/as y generar las competencias necesarias en los/as agricultores/as para que dicha actividad pueda ser replica en sus fincas en cualquier momento. Ver Anexo 2.

Los análisis de suelos, serán una herramienta básica para guiar los procesos de fertilización orgánica y química a realizarse en las parcelas de aprendizaje de las Escuelas de la Revolución Agraria ERA y lotes de producción de agricultores/as vinculados/as al trabajo de las ERA's a nivel nacional.

Así mismo se adjunta el Anexo 3 con una ficha técnica respecto al muestreo de suelo, etiquetado de la muestra y envío, para una correcta ejecución de la actividad en mención. Cualquier duda o comentario, favor contactarse con la Ing. Alexandra Pozo, correo electrónico: apozo@magap.gov.ec, celular: 097 489 188.

A continuación se establecen los pasos a seguir para la ejecución de las tomas de muestra de suelo en las organizaciones de productores/as de las Escuelas de la Revolución Agraria ERA:

1. Presentar la planificación provincial de entrega de muestras, consensuado entre los facilitadores de la provincia. Priorizar la toma de muestras en las parcelas de aprendizaje de las ERA's. El resto de muestras programarlas a los largo del período de entrega en los laboratorios. Favor entregar la planificación provincial de entrega de muestras hasta el día jueves 9 de septiembre del presente.

2. Ejecutar la actividad participativa de toma de muestra de suelos en cada una de las organizaciones, en función a la planificación. Considerar los siguientes puntos:

a. Preparar los materiales a utilizarse en la toma de muestra de suelo. Utilizar fundas plásticas de 1 kg de capacidad, conseguir herramientas (palas, machete, baldes, cuchillos) sin oxido, residuos de abono orgánico, fertilizantes y otros productos que alteren los resultados.

b. Identificar correctamente la muestra de suelo en base al formato adjunto en el Anexo 4 del presente instructivo, llenando adecuadamente los siguientes datos:

i. Código de la muestra, en donde se especificará la región, provincia y número de muestra. Por ejemplo: para Esmeraldas ubicada en la región 1 se colocará el siguiente código: R1 E, seguido del número de la muestra en forma secuencial, iniciando con 0001 en adelante hasta completar el número de muestras asignadas para la provincia. Ver Anexo 5.

ii. Nombre del facilitador

iii. Fecha toma de muestra

Nombre del agricultor

Nombre de la organización de la ERA

vi. Datos de ubicación del lote:

- 1 Región
 - 2 Provincia
 - 3 Cantón
 - 4 Parroquia
 - 5 Barrio/Caserío/Recinto
 - 6 Altitud
 - 7 Longitud, coordenadas UTM
 - 8 Latitud, coordenadas UTM
-

- vii. Característica generales del terreno
- 1 Topografía, marcar con una X en la casilla correspondiente
 - 2 Riego, marcar con una X en la casilla correspondiente.
- viii. Cultivo anterior, especificar la especie vegetal, rendimiento, superficie y fertilizantes aplicados, determinando el tipo de fertilizante y la cantidad aplicada.
Enmiendas realizadas, especificando el tipo y cantidad aplicada.
Profundidad del muestreo, dato requerido únicamente cuando el muestreo se realiza en un cultivo perenne.

- xi. Observaciones finales. Se requiere que el formato sea llenado un original y 2 copias, entregando el original junto con la muestra de suelo al laboratorio, una copia al Coordinador Provincial de las ERA's y la tercera copia a la Subsecretaría de Fomento Agrícola.

Mensualmente los Coordinadores Regionales de las ERA's apoyarán en la verificación de la entrega de los formularios e información a nivel de las provincias a su cargo. La Subsecretaría de Fomento Agrícola podrá en cualquier momento acercarse a las Direcciones Provinciales y verificar los formatos y entrega de la información a las organizaciones.

c. Entregar las muestras debidamente identificadas y las copias del formulario de datos de la muestra a los Coordinadores Provinciales, para que a su vez, las muestras sean canalizadas hacia los laboratorios, según la planificación.

d. Una vez recibidos los resultados de los análisis de las muestras de suelo, éstos deben ser entregados a los productores/as para su respectivo análisis y recomendaciones de fertilización, trabajo en el cual deberá apoyar el facilitador de la ERA.

e. La información de las recomendaciones de fertilización y la cantidad aplicada de abonos y fertilizantes, deberá ser proporcionado a la Subsecretaría de Fomento Agrícola, tanto de la parcela de aprendizaje como de las parcelas muestreadas de los productores/as. Posteriormente, se proporcionará un formato base para el envío de información.

f. Finalmente, el Coordinador Provincial deberá llevar un registro de recepción y entrega semanal de las muestras de suelo. Deberá llenar el formulario adjunto en el Anexo 6. En el documento consta el nombre del facilitador, el código de la o las muestras entregadas, fecha de entrega de la muestra en la Dirección Provincial y firma de responsabilidad.

ANEXO 2

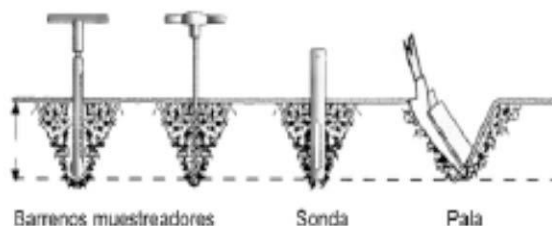
FICHA TÉCNICA PARA LA RECOLECCIÓN DE MUESTRAS DE SUELOS

INTRODUCCIÓN

El Programa Nacional de Innovación Tecnológica Participativa y Productividad Agrícola, consideró relevante realizar el análisis de los suelos para determinar su fertilidad.

Las muestras de suelo, serán un indicador confiable para la elaboración de recomendaciones para la fertilización, los cuales permitirán a los agricultores realizar un uso adecuado de fertilizantes químicos y orgánicos. Los análisis de suelos serán tan buenos como la calidad de las muestras tomadas, por éste motivo una toma de muestra cuidadosa asegura unos resultados de análisis correctos y de gran utilidad.

La manera de hacerlo no es difícil y todo agricultor puede hacerlo, la manera correcta de tomar las muestras para el análisis se detalla a continuación:



MATERIALES

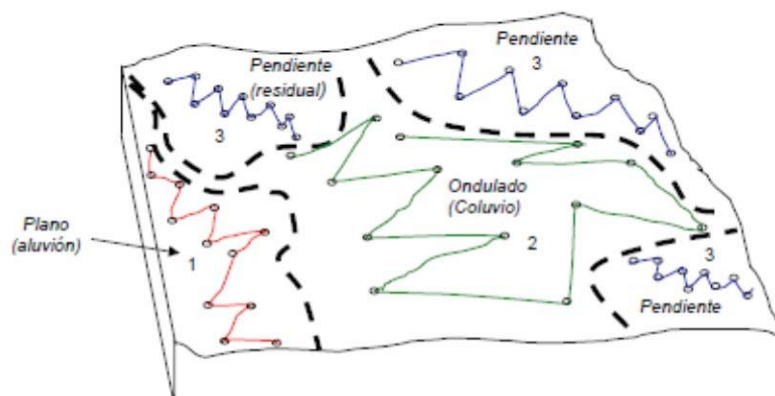
Los materiales a utilizarse son los siguientes:

- Pala recta o barreno
- Cuchillo
- Azadón
- Balde limpio
- Fundas plásticas limpias
- Marcador o lápiz.

CONSIDERACIONES A TENER EN CUENTA

- 1 Evitar tomar muestras en lugares contaminados o que este en contacto con productos químicos como por ejemplo: áreas recién fertilizadas, cerca de casa, estercoleros, saladeros, plantas, silos, caminos, canales y lugares donde hubo quemas recientes.
- 2 Recordar que una muestra es específica para un terreno, por lo que no se deben mezclar muestras de diferentes terrenos y/o beneficiarios.
- 3 Tomar las muestras de suelo un mes antes de la siembra, trasplante o fertilización de los cultivos perennes.
- 4 Recorrer el área para elaborar un croquis del terreno donde se hará el muestreo.
- 5 Cuando el terreno se encuentre con alta humedad (lodoso), no se debe tomar la muestra compuesta de suelo, debiendo buscar un lugar adecuado para la ejecución de la actividad.

PROCEDIMIENTO DE MUESTREO:



1. Recorra y delimite el terreno a muestrear, realizando un croquis sencillo y señale las superficies semejantes (igual manejo, pendiente, vegetación y drenaje).

Fuente: Universidad Nacional de Colombia. Muestreo de suelos

2. Una vez definido los límites de cada terreno se procederá a tomar las submuestras. Para ello, se hace un recorrido sobre el terreno en forma de zigzag, diagonal o en cuadrícula. Tomando de 15 a 20 submuestras en terrenos no mayores a 5 ha y de 20 a 25 submuestras en terrenos no mayores a 20 ha.
3. En cada sitio de muestreo se debe limpiar un área adecuada para poder introducir la pala y/o barreno a una profundidad que nos permita recolectar aproximadamente 100-200 g suelo en el balde plástico. Si se usa una pala, se puede hacer un hoyo en forma de "V" de 20 cm de profundidad y de uno de sus lados saque una porción de 2 a 3 cm de espesor, luego con un cuchillo o machete retire los bordes dejando una submuestra de 5 cm de ancho. Cuando se utiliza barreno se realizan 8 a 10 perforaciones para obtener el volumen requerido para la muestra compuesta.
4. Para cultivos perennes (cacao, banano), se recogerán muestras a una profundidad entre 20 y 50 cm, a una distancia del tallo entre 0,80 y 1 m. Este dato debe anotarse en el formulario.
5. En el caso de encontrar piedras, raíces gruesas, insectos y/o lombrices en las submuestras se debe desmenuzar con la mano y retirar las impurezas. Al final todas las submuestras se mezclarán homogéneamente en el balde y luego se tomará 1 kg aproximadamente. Esta es la muestra compuesta requerida para el análisis.
6. La muestra se depositará en doble funda plástica y la etiqueta se colocará entre las dos fundas.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1 Fundación Hondureña de Investigación Agrícola. 2007. Analicemos el suelo para alimentar adecuadamente a los cultivos. Cortés-Honduras. Consultado el 4 Mayo. 2010. Disponible en: www.gotaverde.org.
- 2 Ministerio de Agricultura y Ganadería. 1991. Aspectos Técnicos sobre Cuarentena y Cinco Cultivos Agrícolas en Costa Rica. Consultado el 28 de julio de 2010. Disponible en: www.mag.go.cr/biblioteca_virtual_ciencia.pdf
- 3 Universidad Nacional de Colombia. s/f. Muestreo de Suelos. Colombia-Medellín. Consultado el 4 de mayo de 2010. Disponible en: www.unalmed.edu.co.
- 4 Laboratorio de Química Agrícola de la Universidad Central del Ecuador. s/f. Prácticas de Nutrimientos de Plantas.

ANEXO 3.

Formulario de identificación de muestras de suelo.

MINISTERIO DE AGRICULTURA, GANADERÍA, ACUACULTURA Y PESCA
SUBSECRETARÍA DE FOMENTO AGRÍCOLA

Datos Correspondientes a la Muestra de Suelos



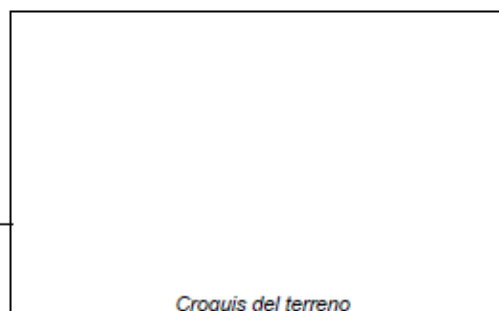
Identificación General

Nombre del técnico: _____ Fecha toma muestra: _____ Código _____
 Nombre laboratorio: _____ Fecha entrega laboratorio: _____
 Región : _____ Provincia: _____
 Parroquia: _____ Cantón: _____ Barrio/Recinto: _____
 Propietario: _____
 Asociación: _____
 Altitud: _____ Longitud: _____ Latitud: _____

Características generales del terreno

Topografía Riego
 Plano Si
 Ondulado No
 Quebrado

Cultivo a sembrarse _____



Lote	Cultivo anterior	Rendimiento (kg/ha)	Superficie (ha)	Fertilizantes aplicados	
				Nombre	Cantidad(qq/ha)
Superficie Total					

¿Se ha efectuado algún tipo de enmiendas? (cal/materia orgánica)

Material _____ Cantidad _____

Profundidad de muestreo *

Cultivo	Edad cultivo perenne	Profundidad del muestreo

Observaciones durante el muestreo (compactación, humedad, otros) _____

* Utilizado para cultivos perennes

Nota: verificar que toda la información este completa y enviar a la Dirección Provincial.

1 original y dos copias