

Evaluación de métodos estadísticos para el
desarrollo de una propuesta de manejo por
sitio específico para banano

Darío Antonio Castañeda Sánchez

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Ciencias Agrarias

Medellín, Colombia

2011

Evaluación de métodos estadísticos para el desarrollo de una propuesta de manejo por sitio específico para banano

Darío Antonio Castañeda Sánchez

Trabajo de investigación presentado como requisito parcial para optar al título de:
Doctor en Ciencias Agrarias

Director:

PhD. José Miguel Cotes Torres.

Co-Director:

MSc. Daniel Francisco Jaramillo Jaramillo.

Línea de Investigación en fisiología

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Ciencias Agrarias

Medellín, Colombia

2011

A mi familia

Agradecimientos

- Al profesor José Miguel Cotes Torres, por su valiosa asesoría y aportes en todo mi proceso de formación.
- Al profesor Daniel Francisco Jaramillo Jaramillo, por su valiosa asesoría, aportes y consejos en todo mi proceso de formación.
- Al director de Centro de Investigaciones del Banano John Jairo Mira, por el apoyo desde su institución a la realización de este trabajo.
- Al técnico Ramón Antonio Piedrahita, por todo el valioso soporte técnico en campo.
- Al técnico Wilson Borja, por su valiosa colaboración en campo.
- A la Ingeniera Marza Cano, por su valiosa ayuda durante la captura de información.
- A la Dirección de Investigación de la Universidad Nacional de Colombia sede Medellín por la cofinanciación del proyecto, código Quipu 20101006728.
- Al Ministerio de Agricultura por el Apoyo financiero del proyecto.
- A la Asociación de bananeros de Colombia, por la cofinanciación del proyecto, y apoyo logístico en la realización del mismo.
- Al Laboratorio de Suelos de la Escuela de Geociencias de la Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín por su colaboración.

Presentación

El objetivo general de este trabajo consistió en determinar diferentes propiedades físico-químicas del suelo y el contenido de raíz funcional de las plantas para seleccionar de entre ellas, mediante diferentes métodos, aquellas más relacionadas con la producción de banano en Urabá, con miras a establecer con ellas un plan de manejo por “Sitio específico” dentro de un “Programa de Agricultura de Precisión para Banano” en la región.

El trabajo comprende cuatro capítulos. En el capítulo uno se presenta una contextualización del aspecto físico ambiental de la región bananera de Urabá, Colombia. En el capítulo dos se detallan los aspectos más relevantes implicados en un programa de agricultura de precisión. En el capítulo tres se exploran diferentes metodologías para descomponer la variabilidad espacial de la producción, se evalúan diferentes métodos estadísticos para encontrar las variables que mejor predicen la producción de banano y las propiedades relacionadas se caracterizan espacialmente.

En el capítulo cuatro, se usa el mejor método encontrado en el capítulo anterior para predecir la producción en dos épocas de muestreo. En este capítulo se implementa el índice de Moran y la tasa de variación espacial para estudiar el comportamiento espacial tanto de la producción como de las propiedades del suelo relacionadas con esta. Finalmente se implementa y evalúa una propuesta de manejo específico por planta.

Contenido

	Pág.
LISTA DE TABLAS	XIII
LISTA DE FIGURAS	XV
INTRODUCCIÓN	1
1. LA REGIÓN BANANERA DEL URABÁ ANTIOQUEÑO.....	5
Bibliografía	11
2. LA AGRICULTURA DE PRECISIÓN.....	13
2.1. Contexto de la agricultura de precisión.....	14
2.2. Definición de agricultura de precisión	15
2.3. Etapas de la agricultura de precisión.....	17
2.3.1. Captura de información espacial	17
2.3.2. Diagnóstico espacial	22
2.3.3. Diseño, implementación y evaluación: propuesta de manejo por sitio específico	34
2.4. La agricultura de precisión en el cultivo de banano.....	38
Bibliografía	39
3. VARIABILIDAD ESPACIAL DE PROPIEDADES DEL SUELO RELACIONADAS CON LA PRODUCCIÓN DE BANANO	47
3.1. Introducción	50
3.2. Materiales y metodología.....	51
3.2.1. Propiedades determinadas.....	53
3.2.2. Análisis estadísticos	55
3.3.1. Análisis descriptivo.....	63
3.3.2. Evaluación de la tendencia espacial en función de los ejes coordenados	69
3.3.3. Evaluación de la tendencia espacial en función de las propiedades del suelo	70

3.3.4.	Modelo lineal general completo, en función de las propiedades del suelo usando variables indicadoras	71
3.3.5.	Variogramas experimentales de la producción	75
3.3.6.	Métodos de selección de variables relacionadas con producción	77
3.3.7.	Análisis espacial.....	84
3.4.	Conclusiones	88
	Bibliografía	89
4.	MANEJO POR SITIO ESPECÍFICO EN EL CULTIVO DE BANANO: CASO DE ESTUDIO EN LA REGIÓN DE URABÁ.....	93
4.1.	Introducción	95
4.2.	Materiales y metodología.....	97
4.2.1.	Ubicación	97
4.2.2.	Muestra	97
4.2.3.	Fertilización	98
4.2.4.	Determinación de propiedades.....	98
4.2.5.	Épocas de muestreo y evaluaciones	99
4.2.6.	Análisis estadístico.....	100
4.2.7.	Propuesta de manejo por sitio específico	102
4.3.	Resultados y Discusión	103
4.3.1.	Variabilidad de la producción y de las propiedades del suelo	103
4.3.2.	Relación entre las propiedades del suelo y la producción de banano	108
4.3.3.	Comportamiento espacial de la producción	113
4.3.4.	Comportamiento espacial de propiedades físicas y químicas del suelo.....	118
4.3.5.	Manejo por sitio específico de variables químicas.....	123
4.4.	Conclusiones	125
	Bibliografía	126

Lista de tablas

Tabla 1.1. Descripción de los suelos de los municipios de Apartadó, Carepa, Chigorodó y Turbo (Ver mapa de la Figura 1.1) (IGAC 2007).	8
Tabla 2.1. Determinación georreferenciada de la producción usando sensoramiento remoto y monitores instalados en cosechadoras y canastos, como métodos alternos a los tradicionales en diferentes cultivos	21
Tabla 2.2. Investigaciones relacionadas con manejo por sitio específico y respuesta en producción y costos en diferentes cultivos	36
Tabla 3.1. Muestreo, determinaciones, y métodos de evaluación de propiedades físicas, químicas y de raíz funcional evaluadas en el campo experimental de Augura, Carepa, Colombia.	54
Tabla 3.2. Guía para la interpretación del análisis de suelos en el cultivo de banano y plátano.	63
Tabla 3.3. Principales estadísticos descriptivos de las propiedades del suelo y comparaciones pareadas de los promedios, en los lotes 3, 4 y 5 del campo experimental de Augura, Carepa, Colombia.....	68
Tabla 3.4. Modelos de regresión explicativos del peso de los racimos construidos a partir de: los ejes coordenados, las propiedades del suelo sin variables indicadoras y de las propiedades del suelo usando el tipo de suelo y los lotes como variables indicadoras.....	72
Tabla 3.5. Parámetros de los modelos ajustados a los semivariogramas empíricos isotrópico y anisotrópicos con y sin tendencia del peso de los racimos de banano.....	76
Tabla 3.6. Precisión de predicción y número de propiedades del suelo relacionadas con producción de ocho métodos de selección de variables. agrupadas por lotes según división de la finca para administración y manejo agronómico de estos. con diferentes tamaños de muestra. Variables evaluadas en el campo experimental de la Asociación de Bananeros de Colombia. municipio de Carepa. Colombia.	79
Tabla 3.7. Coeficientes de regresión de variables explicativas del suelo relacionadas con el peso de racimos de banano, seleccionadas a través del método de encogimiento Lasso ⁽¹⁾ . Variables determinadas en el campo experimental de Augura. Municipio de Carepa. Colombia.	83
Tabla 3.8. Parámetros de los modelos teóricos ajustados a los variogramas experimentales de siete propiedades del suelo relacionadas con el peso del	

racimo, en el campo experimental de Augura. Municipio de Carepa. Colombia.	84
Tabla 4.1. Peso promedio de racimos obtenidos de tres lotes en tres generaciones consecutivas de plantas ubicadas en malla (20 x 20 m). La producción de las dos primeras generaciones obtenidas bajo el mismo manejo agronómico de la finca y la producción de la tercera con manejo por sitio específico.	103
Tabla 4.2. Valor promedio de propiedades físicas de la capa arable determinadas en dos muestreos en el Campo experimental de Augura, Municipio de Carepa Colombia.	105
Tabla 4.3. Rango de nutrientes intercambiables y disponibles, relación de bases, saturación con aluminio, y variabilidad de estos frente a los factores ciclo, lote y sitio, de la capa arable de los suelos de la región bananera de Urabá, Colombia y promedios para el campo experimental de Augura.	107
Tabla 4.4. Coeficientes de regresión de las propiedades del suelo relacionadas con el peso del racimo de banano, en dos muestreos realizados en el Campo experimental de Augura, Municipio de Carepa, Colombia.	110
Tabla 4.5. Índice de Moran y valor p, para evaluar la dependencia espacial de la producción en tres. Datos obtenidos en el Campo Experimental de Augura, Municipio de Carepa, Colombia.	114
Tabla 4.6. Parámetros de los modelos exponenciales ponderados ajustados a los variogramas experimentales del peso de los racimos de banano de tres cosechas, en el Campo experimental de Augura, Carepa, Colombia.	114
Tabla 4.7. Índice de Moran y probabilidad del estadístico Z ($p(Z)$), para evaluación de la dependencia espacial en propiedades químicas y físicas del suelo y de raíz funcional, determinadas en el Campo Experimental de Augura, Municipio de Carepa, Colombia.	119
Tabla 4.8. Parámetros de los modelos teóricos ajustados a los variogramas experimentales para las variables del suelo estandarizadas, con variabilidad espacial estructurada (Índice de moran > 0.1 y $p Z < 0.001$). Variables determinadas en dos épocas de muestreo y en 130 sitios en el Campo experimental de Augura, Municipio de Carepa, Colombia.	121

Lista de figuras

Figura 1.1. Zonas de vida de los municipios de Apartadó, Carepa, Chigorodó y Turbo (IGAC 2007).	6
Figura 1.2. Mapa de suelos de los municipios de Apartadó, Carepa, Chigorodó y Turbo (Ver Tabla 1.1 para leyenda) (IGAC 2007).	7
Figura 2.1. Etapas de la agricultura de precisión y componentes tecnológicos usados en cada una de estas.	18
Figura 2.2. Información soportada por un sistema de información geográfica	23
Figura 2.3. Componentes de un sistema de información geográfica.	24
Figura 2.4. Representación esquemática de un variograma teórico típico con sus parámetros estructurales.	28
Figura 2.5. Tipos de información buscada y clase de sensores usado para adquirir esta información.	32
Figura 2.6. Análisis de imágenes aéreas. A, imagen de baja altitud de una parcela de banano de tres meses de plantada; B, imagen clasificada en las categorías suelo, plantas y coberturas.	33
Figura 3.1. Mapas geográficos. A, Ubicación del campo experimental respecto a los municipios de la región bananera de Urabá, Colombia (coordenadas geográficas); B, Diseño agronómico del cultivo en el campo experimental de Augura (coordenadas planas: UTM WGS84 zona 18 N).	53
Figura 3.2. Distribución espacial y diagrama de cajas y bigotes del peso (kg) de los racimos en: A y C delimitado por lotes; B y D delimitado por unidades de suelo. Las líneas punteadas delimitan los canales de drenaje y los lotes o unidades de suelo.	64
Figura 3.3. Ajuste entre el peso de los racimos de banano y estimaciones del peso de de estos con modelos de regresión construidos a partir de: A. Los ejes coordenados, B. Las propiedades del suelo sin variables indicadoras y C. Las propiedades del suelo utilizando el tipo de suelo y los lotes como variables indicadoras. D. Distribución de los residuales del modelo C en el campo experimental	73
Figura 3.4. Variogramas experimentales y ajustados de las propiedades del suelo relacionadas con producción que presentaron dependencia espacial moderada a fuerte. A. Diámetro ponderado medio del suelo en seco. B. Aluminio intercambiable. C. Cobre disponible.	85
Figura 3.5. Mapas de la distribución de las propiedades del suelo relacionadas con el peso del racimo de banano. A. Mapa del diámetro ponderado medio de	

agregados. B. Mapa de exceso de aluminio intercambiable tomando como punto crítico $< 0.3 \text{ cmol (+) kg}^{-1}$ para el cultivo de banano. C. Mapa de requerimientos de cobre, tomando como punto crítico, el punto central del rango óptimo (8 mg kg^{-1}). D. Gráfico de burbujas para los residuales del peso de racimos. 87

Figura 4.1. Variogramas experimentales del peso de los racimos de banano de tres cosechas y modelo exponencial ajustado a estos. A. Variogramas con pesos de racimos de primera cosecha. B. Variogramas con pesos de racimos de segunda cosecha. C. Variogramas con pesos de racimos de tercera cosecha 115

Figura 4.2. Mapas de isólinas de producción de banano obtenidos por kriging, en el Campo experimental de Augura, Carepa, Colombia. Mapas en coordenadas planas bajo el sistema de proyección WGS 84 zona 18 N. A. Producción primera cosecha, RMSPD (Raíz cuadrada media de los errores de predicción de la validación cruzada) = 6.22 kg. B. Producción segunda cosecha, RMSPD = 6.75 kg. C. Producción tercera cosecha, RMSPD = 5.90 kg. 117

Introducción

Los sistemas de producción agrícola están continuamente influenciados por factores como: el clima, las plagas y las enfermedades, el suelo, el manejo agronómico y aspectos económicos, cuyos efectos sobre la producción, debido a su misma variación, no son constantes en el espacio ni en el tiempo. En los rendimientos del cultivo de banano en Colombia se han registrado variaciones, de hasta 335 cajas de 18 kg ha⁻¹ año⁻¹, de un año a otro para una misma región y de hasta 273 cajas de 18 kg ha⁻¹ año⁻¹ entre regiones productoras. Comportamientos similares se han registrado a escala de finca, evidenciando la existencia de variabilidad espacial y temporal en este cultivo.

La agricultura de precisión está relacionada con la variabilidad en la dimensión espacial y temporal, por lo que resulta ser una herramienta potencialmente útil en el manejo de todos los factores que afectan los rendimientos y el ambiente en la producción agrícola.

En un programa de agricultura de precisión se identifican cuatro etapas:

La primera etapa se relaciona con la captura de información espacialmente referenciada de una característica preferencialmente relacionada con los rendimientos del cultivo o con la calidad ambiental del sistema.

En la segunda etapa se realiza el diagnóstico espacial de la característica de interés, cuya magnitud es el resultado de procesos o actividades que se presentaron en el pasado o se encuentran actuando en el presente, con el objeto de describir patrones, frecuencias y/o predecir el comportamientos futuros de esa característica.

La tercera etapa se enfoca en plantear estrategias de manejo con las cuales se busca modificar el comportamiento o magnitud de la variable de manera diferencial de tal forma que se obtenga una respuesta homogénea y significativamente mejor de la producción, del ambiente o de la variable de interés.

En la cuarta etapa se hace la evaluación del impacto de la estrategia de manejo sobre los rendimientos, los costos y en general en el mejoramiento o no de la rentabilidad del programa de manejo por sitio específico con sus respectivos ajustes.

Una propuesta de agricultura de precisión es una estrategia de manejo por sitio específico diseñada con base en las anteriores etapas, para un cultivo determinado y según la tecnología y recursos disponibles. La propuesta debe ser estandarizada bajo las condiciones de campo a fin de evaluar su consistencia en el tiempo.

Los objetivos del trabajo fueron:

Objetivo general

Evaluar el comportamiento espacial de los rendimientos en el clon de banano Williams y su relación con el factor edáfico, con miras a establecer un programa de manejo por sitio específico en una finca de banano en la región de Urabá.

Objetivos específicos

Determinar la variabilidad espacial de algunas propiedades físicas, químicas del suelo con mayor incidencia en el rendimiento del banano en Urabá.

Generar un modelo, para la estimación de la producción en función de ellas y de su variabilidad espacial.

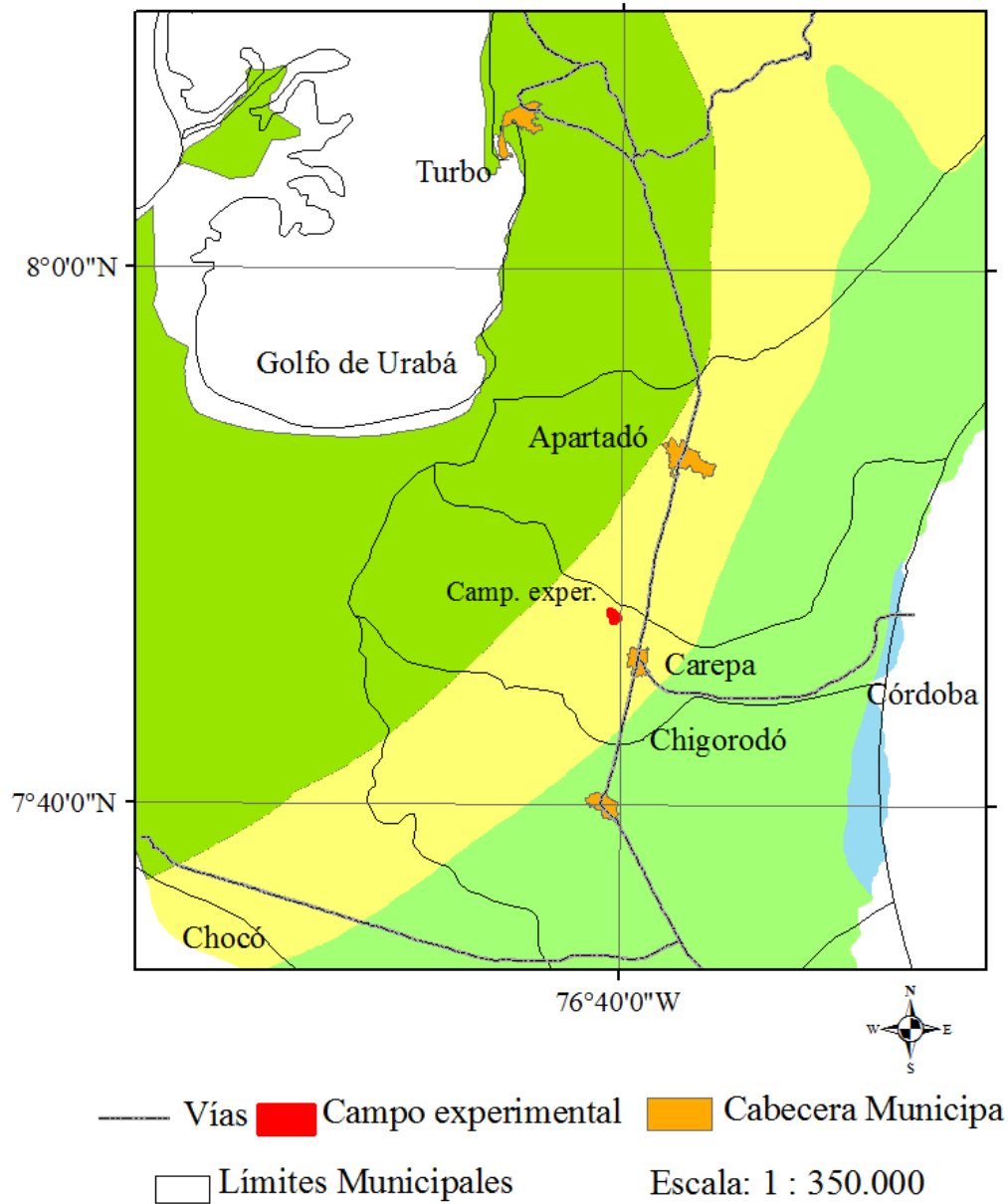
Proponer, implementar y evaluar una estrategia de manejo por sitio específico, en un campo experimental de la región de Urabá, basada en la información obtenida, así como en los principios y herramientas de la agricultura de precisión, con miras a determinar su impacto en el incremento de los rendimientos, eficiencia en el uso de insumos y efecto ambiental.

1. La región bananera del Urabá Antioqueño

The banana crop region of the Uraba Antioqueño

Las plantaciones de banano de exportación, en el departamento de Antioquia, se ubican en una alta proporción (90 %) en el bosque húmedo tropical. El diez por ciento restante en la franja del bosque muy húmedo premontano transición tropical de los municipios de Apartadó, Carepa, Chigorodó y Turbo (Figura 1.1).

La región de Urabá se caracteriza por un ambiente morfogenético de origen depositacional que corresponde a eventos sucesivos de sedimentación fluvial, lo que permitió el llenado de combas de plegamiento dejadas por el surgimiento de la serranía de Abibe, para conformar los paisajes actuales de planicie aluvial, piedemonte, planicie fluvio-marina y planicie fluvio-lacustre. Los tipos de suelos que se presentan en la zona bananera de acuerdo con el IGAC (2007), aparecen mapeados en la Figura 1.2 y descritos en la Tabla 1.1.



⁽¹⁾Bosque húmedo tropical. ⁽²⁾Bosque muy húmedo premontano transición tropical. ⁽³⁾ Bosque muy húmedo tropical. ⁽⁴⁾Bosque pluvial premontano.

Figura 1.1. Zonas de vida de los municipios de Apartadó, Carepa, Chigorodó y Turbo (IGAC 2007).

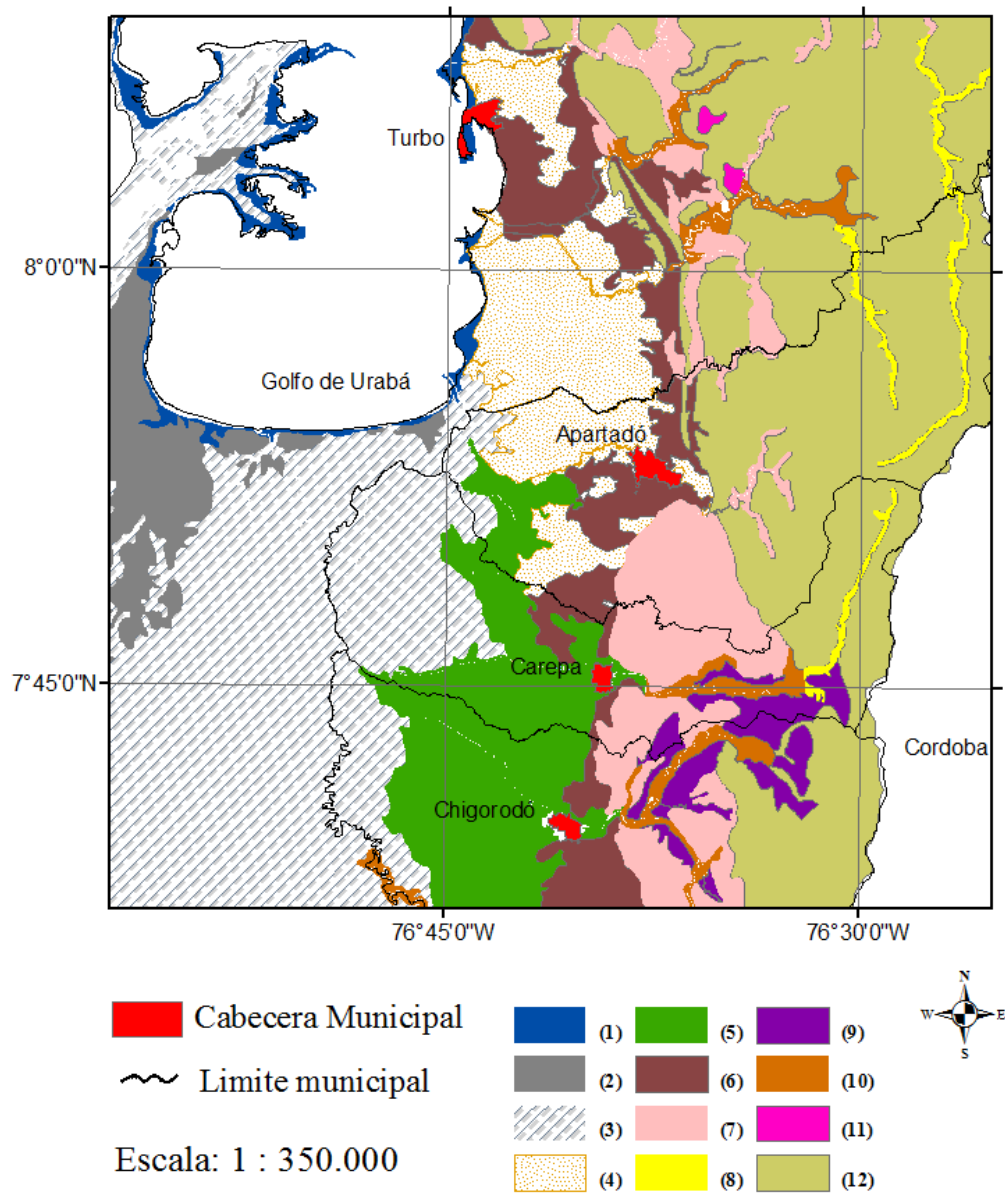


Figura 1.2. Mapa de suelos de los municipios de Apartadó, Carepa, Chigorodó y Turbo (Ver Tabla 1.1 para leyenda) (IGAC 2007).

Tabla 1.1. Descripción de los suelos de los municipios de Apartadó, Carepa, Chigorodó y Turbo (Ver mapa de la Figura 1.1) (IGAC 2007).

Símbolo	Suelos
	1 Suelos de clima cálido seco a cálido húmedo, ocupan las posiciones geomorfológicas de plataforma costera y plano de marea, en relieve plano, originados de sedimentos marinos gruesos y materiales orgánicos; son muy superficiales, moderada a muy pobremente drenados, inundables, de texturas gruesas. La unidad está constituida por los suelos Haplofibrists, Ustipsamments e inclusiones de Haplohemists, Psammaquents y Fluvaquents.
	2 Pantano
	3 Suelos de clima cálido muy húmedo en plano de inundación, con relieve plano; se han originado de sedimentos mixtos fluviolacustres y materiales orgánicos; son muy superficiales a moderadamente profundos, muy pobre a moderadamente bien drenados, tienen texturas medias a finas y fertilidad moderada a alta; comprende los suelos Endoaquents, Haplohemists, Eutrudepts, Udifluents y Fluvaquents.
	4 Suelos de clima cálido húmedo, en terrazas aluviales planas, desarrollados de aluviones de diferente granulometría; son superficiales a moderadamente profundos, bien a pobremente drenados, de texturas gruesas a finas y fertilidad alta a muy baja. Integran esta unidad los suelos Hapludults, Dystrudepts, Endoaquents y Udorthents.
	5 Suelos de clima cálido muy húmedo, en terrazas aluviales planas, originados de sedimentos aluviales mixtos; son bien a pobremente drenados, presentan texturas variadas y fertilidad alta. Esta unidad está integrada por los suelos Eutrudepts y Endoaquents.
	6 Suelos de climas cálido húmedo y cálido muy húmedo de abanicos, de relieve plano a ligeramente ondulado, originados de depósitos aluviales mixtos; son superficiales a profundos, bien a imperfectamente drenados, tienen texturas gruesas a finas, reacción muy fuerte a moderadamente ácida y fertilidad moderada a alta; los suelos dominantes son Eutrudepts y Endoaquents.
	7 Suelos de clima cálido seco a húmedo y muy húmedo localizados en lomas, colinas y vallecitos de relieve plano a moderadamente escarpado; se han originado de arcillolitas, areniscas, granodioritas y filitas y de aluviones de granulometría variada; son profundos, moderadamente profundos y superficiales; bien y pobremente drenados, de texturas variadas, reacción muy fuerte a ligeramente ácida y fertilidad baja a moderada; comprende los suelos Dystrudepts, Eutrudepts y en bajas proporciones suelos Udorthents, Endoaquents, Udifluents, Kandiudox, Hapludox y Hapludolls.
	8 Suelos de clima cálido seco a cálido húmedo, de lomas y colinas, filas y vigas, espinazos y vallecitos, de relieve plano a escarpado, originados de rocas sedimentarias e ígneas y de sedimentos coluvioaluviales mixtos; son superficiales a profundos, bien drenados, de texturas medias a finas y fertilidad moderada a alta; comprende los suelos Udorthents, Haplustepts, Hapludolls, Dystrudepts y Udipsamments.
	9 Suelos de clima cálido muy húmedo de abanicos aluvio-torrenciales, abanicos aluviales, terrazas y glacis, de relieve plano a quebrado; se han originado de depósitos aluviales mixtos con aportes coluviales gruesos; son superficiales y profundos, bien drenados, de texturas variadas, reacción muy fuerte a ligeramente ácida y fertilidad baja a moderada; tiene como componentes principales los suelos Udorthents, Dystrudepts y Eutrudepts.
	10 Suelos de clima cálido húmedo, ocupan planos de inundación de relieve plano; se han originado de aluviones finos y medios; son superficiales y profundos, bien a pobremente drenados, en algunos sectores, inundables; tienen texturas variadas y fertilidad baja a alta; esta compuesta por los suelos Endoaquents, Eutrudepts, Udorthents y Udifluents.
	11 Suelos de clima cálido húmedo, en terrazas aluviales con relieve plano a ondulado, desarrollados de aluviones finos, medios y gruesos; son profundos y superficiales, bien a pobremente drenados, texturas variadas y fertilidad baja a muy baja; comprende los suelos Dystrudepts y Endoaquents.
	12 Suelos de clima cálido húmedo a muy húmedo, localizados en espinazos, colinas, filas y vigas, de relieve plano a escarpado; se han originado de rocas sedimentarias, metasedimentarias, metamórficas y depósitos coluviales mixtos; son superficiales y profundos, bien drenados; tienen texturas moderadamente gruesas a finas y fertilidad moderada a alta; comprende los suelos Dystrudepts, Eutrudepts, Udorthents, Hapludox y Hapludolls.

En Colombia la agroindustria bananera se ha desarrollado como una Cadena agroexportadora tradicional, generando importantes divisas para el país y manteniendo su posición como exportadora neta, después del café y las flores. En Colombia se tienen dos regiones productoras de banano una en el noroccidente del departamento de Antioquia con 33500 ha y un volumen de producción de 71.7 millones cajas año⁻¹ de 18 kg cada una, con un valor de US \$ 533.31 millones y la otra región comprende 11000 ha en la costa norte colombiana, distribuidas en los departamentos del Magdalena y la Guajira de las cuales se exportaron 25 millones de cajas año⁻¹ por valor de US \$ 172.31 (Augura 2010).

Aunque se desarrollan otros renglones productivos diferentes al banano como plátano, arroz, maíz, ganadería, en las regiones de Urabá y Magdalena, hay una alta dependencia económica de la actividad bananera. El sector bananero ha sufrido frecuentes crisis de tipo socioeconómico debidas a factores como la revaluación del peso y disminución de rendimientos a causa de factores climáticos, plagas y enfermedades y manejo agronómico. Además, se ha presentado un incremento paulatino en los costos de mano de obra y agroinsumos, principalmente, lo que ha redundado en convertirlo en un sector altamente competitivo.

Al ser el banano colombiano un producto de exportación, la producción se rige de acuerdo a las exigencias internacionales de producción amigable y de protección del medio ambiente (Londoño et al. 2002). Por otra parte en los últimos diez años el cultivo ha experimentado variaciones en los rendimientos con tendencia decreciente,

lo que puede estar evidenciando cambios importantes en algunos factores que controlan la producción.

Aparte de lo anterior, buena parte de la tecnología usada en el cultivo de banano se ha adoptado de los desarrollos generados en Centro América, para condiciones de suelo, climáticas y culturales diferentes. En este sentido, con el presente trabajo se pretende aportar al desarrollo de tecnologías e indicadores propios, bajo las condiciones de los suelos y clima de la región de Urabá, aspirando a contribuir con el mejoramiento de algunas de las prácticas de manejo agronómico del cultivo.

Para lograr lo anterior, una alternativa es la implementación de la Agricultura de Precisión ya que como lo sostiene Emmen (2004), esta es una metodología que pretende incrementar la eficiencia de los sistemas de producción, optimizar el uso de agroquímicos, proteger el ambiente, conservar los recursos naturales y garantizar el manejo sostenible de la tierra. Uno de los dos países que están por encima de Colombia en exportaciones de banano, Costa Rica, se ha comprometido desde finales de la década de los 90's con un plan de agricultura de precisión en sus explotaciones (Stoorvogel y Vargas 1998, Soto 2000, Tijerino y Bizonhin 2002).

Es urgente para el país emprender programas de investigación que permitan entender la dinámica y las interrelaciones entre las variables edáficas y cómo ellas están incidiendo en los rendimientos de nuestros cultivos de banano. Paralelamente, se deben desarrollar métodos tecnológicos que nos permitan diagnosticar oportunamente las problemáticas de la producción, de modo que se puedan tomar los correctivos a tiempo. Es en respuesta a estas necesidades que se planteó esta

investigación, pretendiendo conocer la variabilidad espacial de las variables que conforman el factor edáfico y el efecto que ellas tienen sobre el desarrollo de la planta, así como su relación con los rendimientos, para evaluar finalmente si estas variables se pueden traducir en prácticas de manejo viables económica y tecnológicamente para cualquier productor bananero.

Bibliografía

1. AUGURA 2010. Coyuntura bananera 2009, 34 p.
2. Emmen, D. 2004. La agricultura de precisión: una alternativa para optimizar los sistemas de producción. *Invest.Pens. Crit.* 2.; p. 68-74.
3. Instituto Geográfico Agustín Codazzi, 2007. Estudio semidetallado de suelos de las áreas potencialmente agrícolas, Urabá departamento de Antioquia. Ed. IGAC, Bogotá, 439 p.
4. Londoño, M.; Osorno, M.; Vélez, J.; García, F.; Montoya, M.; Olaya, U. 2002. Banatura: programa de gestión social y ambiental del sector bananero colombiano. Acorbat. Memorias XV reunión. Medellín, p. 343-348.
5. Soto, M. 2000. El cultivo del banano. [Libro en CD-ROM], San José de Costa Rica.
6. Stoorvogel, J. y Vargas, R. 1998. La agricultura de precisión en banano. p. 40-55. Rosales, F.; Tripon, S. y Cerna, J. Editores. Taller Internacional sobre Producción de Banano Orgánico y, o, Ambientalmente Amigable. Memorias, Costa Rica: 27-29 de Noviembre de 1998, 265p.
7. Tijerino, P. J. M. y Bizonhin, C. 2002. Agricultura de precisión en banano (Musa AAA); una herramienta para la toma de decisiones acertadas. Trabajo de Graduación. Ingeniería Agronómica. Universidad Earth. Guácimo. Costa Rica. 52 p.

2. La agricultura de precisión

The precisión Agriculture

Resumen

En este capítulo se hace una descripción de las etapas de la agricultura de precisión, detallando las diferentes estrategias seguidas para diseñar e implementar un programa de manejo por sitio específico. Se hizo especial énfasis en una revisión mundial de los avances tecnológicos logrados en cada una de las etapas de la agricultura de precisión, según el tipo de cultivo. Al final del capítulo, se hace una discusión de los avances logrados en agricultura de precisión en banano.

Términos para indexación: Manejo por sitio específico, Sensor, sensoramiento remoto, SIG, GPS

Abstract

This chapter is based on a description of the different components of precision agriculture, detailing of the strategies used to planning and establish a management program. Special emphasis was made on a global review of technological progress in

each of the stages of precision farming, according to the type of crop. At the end of the chapter is a discussion of progress in precision agriculture in banana.

Keywords: Site specific management, Sensor, Aerial image, remote sensing, GIS, GPS.

2.1. Contexto de la agricultura de precisión

El término “agricultura de precisión” comenzó a usarse en el año 1990, nombrando con éste el taller realizado en Great Falls, Montana, patrocinado por la Universidad del Estado de Montana. Antes de este suceso, se usaban como sinónimos los términos “manejo por sitio específico del cultivo”, o agricultura por sitio específico (McBratney *et al.* 2005, Oliver 2010 a).

No obstante, la agricultura de precisión ha sido empleada intuitivamente por los agricultores desde el surgimiento mismo de la agricultura, en el sentido de que repartieron las tierras en áreas pequeñas, a las cuales les conocían bien sus características, para establecer los cultivos de acuerdo con éstas, cuando las condiciones eran adecuadas. Para estos agricultores, el término precisión se basó en el aseguramiento del alimento para la familia (Zang *et al.* 2002, Pringle *et al.* 2005, Oliver 2010b).

Hasta la década de 1980, el manejo por sitio específico, se realizó a escala de finca y la unidad de manejo era todo el campo de cultivo (manejo tradicional). Este sistema de manejo es empleado actualmente en la mayoría de cultivos tropicales. La

fertilidad del suelo se evalúa a través de una muestra compuesta formada de submuestras tomadas aleatoriamente de todo el campo y sobre la cual se determina el nivel promedio de nutrientes; con base en ésta, se determina la aplicación uniforme de enmiendas y fertilizantes. La producción se obtiene como el peso total de todo el campo (Sirinivasan 2006).

El concepto moderno de agricultura de precisión ha sido impulsado y respaldado por los avances logrados por la tecnología de la información, el desarrollo de software y de sensores, algunos de éstos incorporados ya a la maquinaria agrícola. Esto permitió mejorar la frecuencia, la resolución y la calidad de la información adquirida de la finca, así como generar propuestas de manejo, dirigidas según la ubicación, de mejor calidad, en menor tiempo y con menor impacto ambiental (Pierce y Nowak 1999, Oliver 2010b).

2.2. Definición de agricultura de precisión

Los términos más usados para describir el concepto de agricultura de precisión son: manejo por finca, por suelo o por sitio específico y aplicación variable de insumos, entre otros. Todos éstos tienen en común el concepto de manejo de la variabilidad, a diferentes escalas dentro del campo. Basados en este hecho, Stafford *et al.* (1996) definen la agricultura de precisión como “la estrategia de incorporar las entradas a la capa arable de acuerdo a la ubicación y a los requerimientos del cultivo”.

Según Pierce y Nowak (1999), no existe un sistema de agricultura de precisión como tal; además, se han usado independientemente varios componentes del manejo tradicional de cultivos con la filosofía del manejo por sitio específico, buscando incrementar su potencial. En este sentido, el National Research Council (1997), define la agricultura de precisión como “una estrategia de manejo que usa tecnologías de la información para adquirir datos de múltiples características del campo, para soportar las decisiones de manejo del cultivo”.

Pierce y Nowak (1999), sostienen que con los avances de la información se aumentó la dimensionalidad de la información adquirida, pudiendo enfatizar sobre la premisa básica de la agricultura de precisión: el manejo de la variabilidad en las dimensiones espacial y temporal. Basados en ese concepto, los mencionados autores definen la agricultura de precisión como: “la aplicación de tecnologías y principios para manejar la variabilidad espacial y temporal asociada con todos los aspectos de la producción agrícola con el objetivo de mejorar la eficiencia del cultivo y la calidad ambiental”.

2.3. Etapas de la agricultura de precisión

Basados en la definición de agricultura de precisión dada por Pierce y Nowak (1999), se considera que ésta puede ser llevada a cabo en cuatro etapas, utilizando diferente tecnología en cada una de ellas (Figura 2.1) (Arslan y Colvin 2002, Jensen *et al.* 2000, Lan *et al.* 2009, Stafford 2002).

2.3.1. Captura de información espacial

La evaluación de la variabilidad espacial de las características del sistema agrícola, así como de la aplicación de entradas por sitio específico a éste, requiere del control de la ubicación.

En la actualidad, dependiendo de la característica a monitorear y de la tecnología disponible, se cuenta con diferentes opciones.

Método de Posicionamiento relativo, es un método simple en el cual la posición es determinada respecto a un punto con coordenadas conocidas, a través de un teodolito, una estación total o combinadamente, determinando la distancia con un radar y la dirección con un giroscopio (Auernhammer y Muhr 1991).

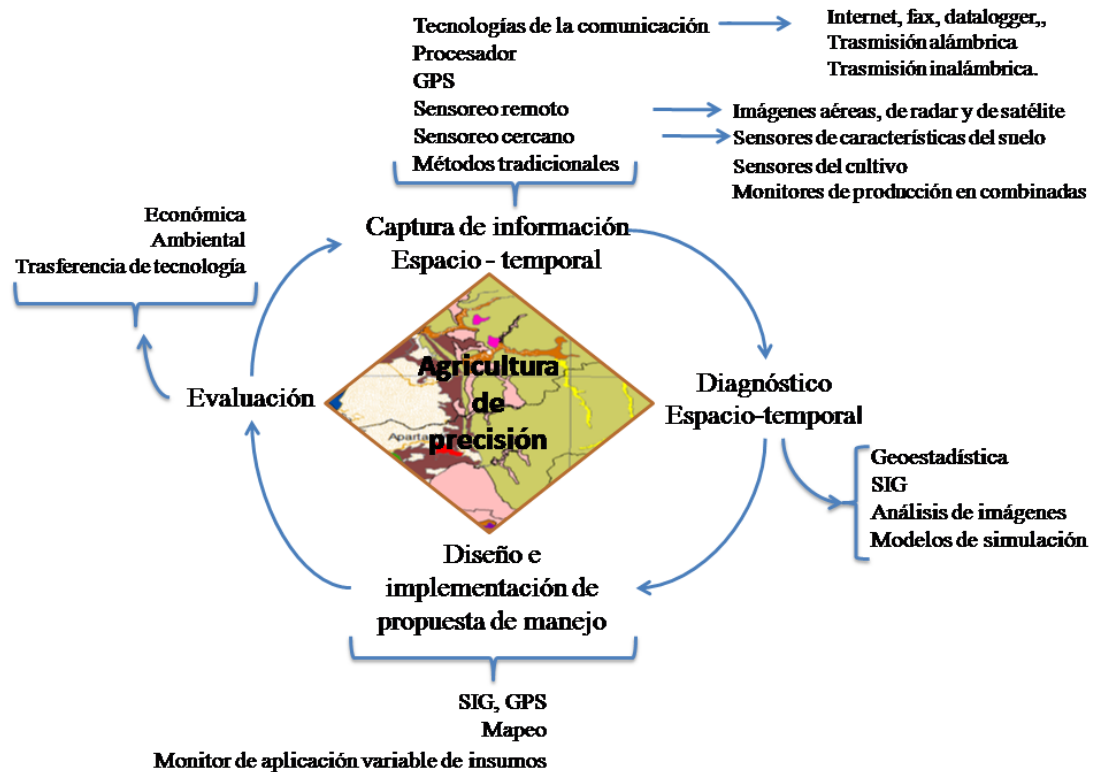


Figura 2.1. Etapas de la agricultura de precisión y componentes tecnológicos usados en cada una de estas.

Métodos de triangulación, en éstos la posición es determinada respecto a dos o más puntos con coordenadas conocidas usando por ejemplo, señales de radio desde una red de estaciones de referencia a unidades receptoras móviles (Garrot *et al.* 1986, Schenk 1998).

Sistema de posicionamiento global, se basa en la determinación de la posición por triangulación, usando un receptor que recibe información desde una red de satélites y con la cual se determina la ubicación relativa a éstos. Es una tecnología ampliamente usada en agricultura de precisión porque consume poco tiempo de

adquisición y, dependiendo del receptor, pueden obtenerse precisiones de ubicación sub-métricas (Pierce y Nowak 1999).

La fotogrametría, es la práctica de determinar las propiedades geométricas de los objetos a partir de fotografías. Lo más común es el uso fotografías tomadas por una cámara especial situada en una aeronave o en un satélite (Altan *et al.* 2001).

Las características de los agro-ecosistemas que tienen influencia sobre la producción agrícola y para las cuales habría que tomar información de ubicación, se pueden categorizar en seis grupos, de acuerdo con Lee *et al* (2010) y Zhang *et al.* (2002):

- a *Variabilidad de la producción*, distribuciones históricas y actuales de la producción.
- b *Variabilidad micro-geomorfológica*, características fisiográficas como la topografía, la altura, la pendiente, el tipo de suelo, las terrazas, proximidad a cuerpos de agua, drenajes, límites de lotes, entre otros.
- c *Variabilidad del suelo*, propiedades físicas, químicas, biológicas y de otro tipo del suelo.
- d *Variabilidad del cultivo*, características como variedades cultivadas, densidades de siembra, altura de la plantación, propiedades biofísicas del cultivo (índice de área foliar, radiación fotosintéticamente activa interceptada, biomasa), entre otras.

- e *Variabilidad de factores anómalos*, aspectos como malezas, plagas, nematodos, enfermedades, aspectos climáticos (heladas, sequías, vendavales).
- f *Prácticas agronómicas*, actividades de labranza, aplicación de insumos (fertilizantes, plaguicidas), prácticas culturales, rotación de cultivos, aplicación de riego, cosecha, entre otras.

Los avances de la tecnología y la información han permitido el desarrollo de varios sistemas de sensores que permiten, de manera directa o indirecta la determinación espacial de muchas de las características del agro-ecosistema relacionadas con la producción (Lee *et al.* 2010, Powell *et al.* 2007). En la Tabla 2.1 se referencian el uso de sensoramiento remoto y de monitores instalados en cosechadoras o canastos como métodos, alternos a los tradicionales, para determinar los rendimientos en diferentes cultivos.

Se ha usado ampliamente el sensoramiento cercano y remoto para determinar la variabilidad micro-geomorfológica de los suelos cultivados (Mulder 1987), las coberturas y el uso de los suelos (Castañeda *et al.* 2006, Sommer *et al.* 1998, Thunissen *et al.* 1992), la variabilidad de los cultivos (Thenkabail *et al.* 2000), las propiedades fisicoquímicas del suelo (Ben-Dor 2002, Mulder 1987), factores anómalos como plagas, enfermedades y deficiencias nutricionales (Hann 2009, Martin *et al.* 2007, West *et al.* 2003).

Tabla 2.1. Determinación georreferenciada de la producción usando sensoramiento remoto y monitores instalados en cosechadoras y canastos, como métodos alternos a los tradicionales en diferentes cultivos

Grupo	Tecnología usada	Cultivo	Precisión de estimación de producción (%)	Fuente
Cereales	Sensoramiento remoto: imágenes multi-espectrales e hiper-espectrales en aeronaves y satélites	Maíz	90.4	Soria-Ruiz <i>et al.</i> (2004).
		Trigo	45 - 75	Du <i>et al.</i> (2009).
		Arroz	68	Cai y Sharma (2009)
		Cebada	93%	Weissteiner y Kühbauch (2005)
	Monitor de producción instalado en cosechadora, con GPS	Trigo, Maíz, Cebada, Algodón	100	Passioura (2002), Perez-Muñoz y Colvin (1996), Pringle <i>et al.</i> (2003), Vellidis <i>et al.</i> (2001 y 2003), Wright <i>et al.</i> (2003)
Perennes	Sensoramiento remoto: imágenes multi-espectrales e hiper-espectrales en aeronaves y satélites	Arándano agrio	65	Oudemans <i>et al.</i> (2002)
		Cítricos	100	Ye <i>et al.</i> (2006)
		Mango	no confiable	Yadav <i>et al.</i> (2002)
		Caña de azúcar	50 - 79	Santos <i>et al.</i> (2005), Theodor y Teixeira (1990)
		Banano	60 - 86	Castañeda (2005), Oberthür <i>et al.</i> (2007), Yang <i>et al.</i> (2009)
		Vid	11 - 15	Saraswat (2007).
	Monitor de producción instalado en cosechadora, con GPS	Café	100	Sartori <i>et al.</i> (2003)
	Monitor de producción instalado en canastas, con GPS	Caña de azúcar	96 - 97	Magalhães y Cerri (2007)
		Cítricos	98 - 100	Tumbo <i>et al.</i> (2002)
Anuales	Sensoramiento remoto: imágenes multi-espectrales e hiper-espectrales en aeronaves y satélites	Papa	76	Bala <i>et al.</i> (2007)
		Fresas	42 - 56	Saraswat (2007)
		Frijol	45 - 79	Oberthür <i>et al.</i> (2007)
		Soya	86	Prasad <i>et al.</i> (2005)
	Monitor de producción instalado en cosechadora	Tomate de mesa	99.7	Pelletier y Upadhyaya (1999)
		Maní	99	Vellidis <i>et al.</i> (2003)

2.3.2. Diagnóstico espacial

La descripción, explicación y predicción de patrones y frecuencias en procesos, actividades o características a escala geográfica, puede ser llevada a cabo con tres herramientas, en ocasiones, usadas de manera independiente, pero frecuentemente, usadas de manera combinada. Estas herramientas son: los sistemas de información geográfica (Longley *et al* 2005), la geo-estadística (Oliver 2010 a y b), y el análisis de imágenes (Schowengerdt 2007).

Sistemas de información geográfica (SIG). Los SIG se pueden entender como una clase especial de sistemas de información que permiten el monitoreo geográfico de eventos, actividades, cosas y características situadas sobre o debajo de la superficie terrestre, ayudando también a prevenir que estos se presenten o existan. Los SIG son una herramienta tecnológica que están soportando tanto a la ciencia, como a todas las actividades desarrolladas por el hombre, usando información geográfica específica o general (Figura 2.2).

Longley *et al.* (2005), propone tres criterios para identificar y clasificar actividades geográficas de las que no lo son:

- a Las actividades geográficas tienen asociado un nivel de escala o nivel de detalle, que depende de la característica trabajada.
- b Las actividades geográficas tienen una intención o propósito. Muchas actividades son por naturaleza estrictamente prácticas, y deben ser ejecutadas

tan rápido como sea posible para minimizar el riesgo y/o costos. Otras pueden ser mejor caracterizadas como de conocimiento técnico y científico, por ejemplo un mapa de tipos de suelos, de distribución de variedades de cultivos, entre otras.

- c Las actividades geográficas tienen asociada una escala de tiempo.

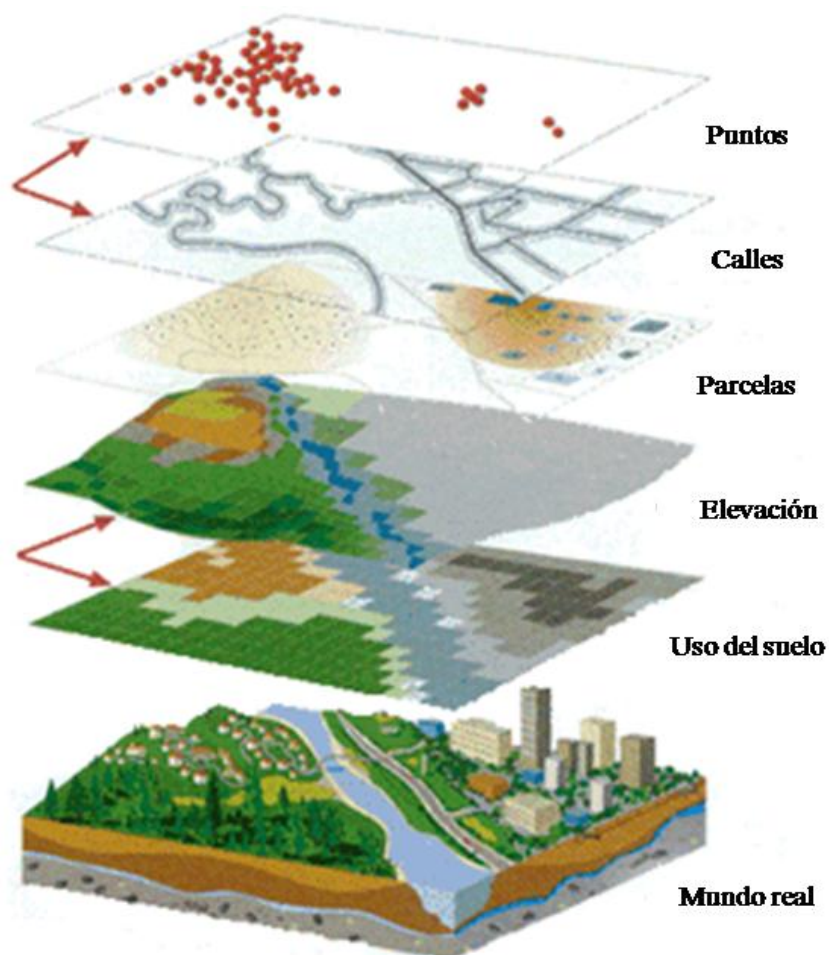


Figura 2.2. Información soportada por un sistema de información geográfica

Un SIG está conformado por seis partes bien definidas (Figura 2.3). *La red*, la cual facilita la comunicación e intercambio rápido de información entre las personas sin importar su ubicación. En la actualidad, los SIG y el internet han establecido una estrecha relación, beneficiando casi todas las actividades humanas, al punto de considerarse una herramienta que potencia la competitividad de una persona, empresa, o estado (geo-comercio, servicios basados en la ubicación para telefonía celular, seguridad, servicios geográficos, entre otros aspectos) (Longley *et al.* 2005).

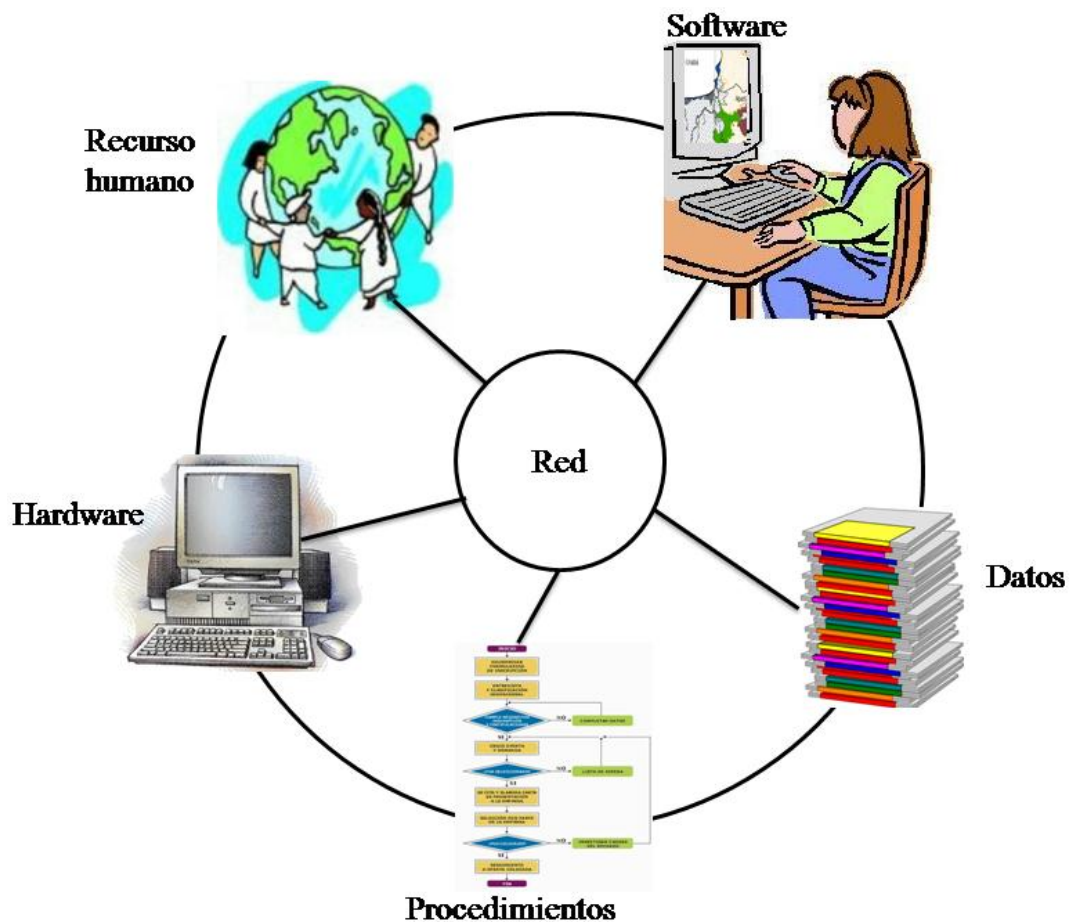


Figura 2.3. Componentes de un sistema de información geográfica.

El hardware, es el dispositivo que permite el almacenamiento y manipulación de la información, la instalación del software, la aplicación de procesos y la interacción entre usuarios. *El software*, trabaja localmente en las maquinas de los usuarios ejecutando todas las tareas y procedimientos asignados por estos. *La base de datos*, consiste de una representación digital de características de algún área específica de la superficie terrestre, o cerca a ésta, con el propósito de resolver algún problema o mejorar el conocimiento técnico o científico.

Un SIG, también requiere de administración y manejo. Se deben establecer *procedimientos*, que integran líneas de reporte, puntos de control, y otros mecanismos que aseguren que las actividades sean de alta calidad y en general cumplen con los requerimientos de la organización.

Por último, un SIG no será posible sin las *personas* que diseñan, programan, introducen la información e interpretan sus resultados (Longley *et al.* 2005, Pierce y Nowak 1999).

Procedimientos liderados por el análisis geoestadístico. David Mulla fue la primera persona en aplicar explícitamente el término geoestadística en agricultura de precisión, cuando buscaba determinar la naturaleza y magnitud de la variación espacial del fósforo y del potasio en el suelo (Mulla y Hammond 1988). El mencionado autor se basó en los desarrollos logrados por Matheron (1963), para describir la variación espacial de muchas propiedades determinadas sobre o debajo de la superficie terrestre, las cuales requerían, para su análisis, de métodos alternos a los determinísticos tradicionales. El término estadística espacial es usado para describir

un amplio rango de modelos y métodos estadísticos que son usados para analizar datos espacialmente referenciados. En la estadística espacial, el término geoestadística se refiere a modelos y métodos aplicados a una muestra discreta de datos observados (Y_i) en sitios específicos (x_i) dentro de una región, para estudiar una variable espacialmente continua (Diggle y Ribeiro 2007).

En la mayoría de investigaciones, los objetivos perseguidos con un análisis geoestadístico, según Schabenberger y Gotway (2005), pueden ser de dos tipos: el de la estimación y el de la predicción. *Estimación*, se refiere a la inferencia de los parámetros del modelo probabilístico para los datos. Ésto puede incluir parámetros de interés científico directo, por ejemplo, aquellos que definen una relación entre una variable respuesta y una variable explicativa, y parámetros de interés indirecto, por ejemplo, aquellos que definen la estructura de la dependencia espacial del modelo. *Predicción*, se refiere a la inferencia acerca de la magnitud que toma la variable en una ubicación no muestreada. Típicamente se presenta como un mapa de valores predichos de la variable de interés en una región determinada.

El diseño de muestreo puede ser determinístico cuando las coordenadas del conjunto de muestras forman una malla sobre la región de estudio, o probabilístico cuando las ubicaciones son seleccionadas aleatoriamente. El diseño de muestreo también puede ser uniforme, si la intensidad de muestreo es la misma en toda la región, o no uniforme cuando ésta varía sistemáticamente, es decir algunos sectores son intencionalmente muestreados con mayor intensidad que otros (Diggle y Ribeiro 2007, Schabenberger y Gotway 2005).

Para explorar si los datos presentan estructuración espacial, un gráfico de la variable respuesta contra cada uno de los ejes coordenados puede mostrar relaciones entre ellos y un gráfico de burbujas de la variable respuesta contra los ejes coordenados puede mostrar tendencias en los datos. No obstante, la evaluación visual de la autocorrelación espacial en los mencionados gráficos es difícil. Una evaluación exploratoria más clara y útil es el variograma empírico el cual es definido como:

$$v_{ij} = 1/2 (y_i - y_j)^2$$

Donde v_{ij} es la semi-varianza para muestras de la variable respuesta ubicadas, cada una, en las posiciones i y j . Si y_i presenta media espacialmente constante, entonces la semivarianza v_{ij} tiene un valor esperado igual a $\sigma^2\{1 - \rho(u)\}$ donde σ^2 es la varianza y $\rho(u)$ denota la correlación entre los puntos y_i y y_j , ubicados a una distancia u , y se aproximará a cero para grandes distancias, al tiempo que σ^2 se aproxima a un valor constante, denominado *meseta*. Si no hay dependencia espacial, y_i no correlacionado con y_j , entonces todas las varianzas v_{ij} , tendrán un valor aproximado al valor esperado de σ^2 (Figura 2.4).

Cuando la respuesta media $\mu(x)$ de la variable depende de la ubicación, se dice que el proceso no es estacionario y que presenta *tendencia espacial*. En la práctica, una forma frecuente de extraer la tendencia es a través de un modelo de regresión de la variable respuesta en función de los productos cruzados de los ejes coordenados expresados en polinomios lineales o cuadráticos, también denominados modelos de superficie de tendencia lineal o cuadrática (Schabenberger y Pierre 2002).

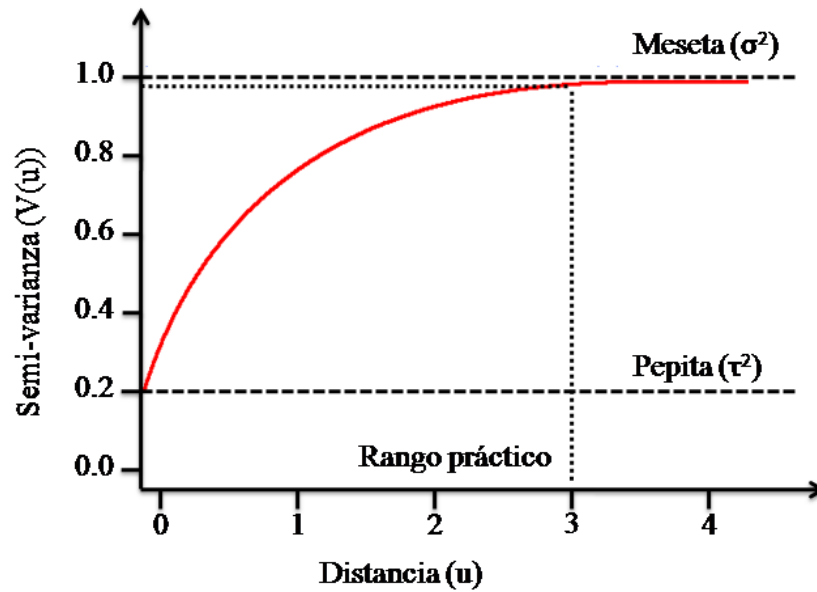


Figura 2.4. Representación esquemática de un variograma teórico típico con sus parámetros estructurales.

Sin embargo, Diggle y Ribeiro (2007) argumentan que una clase mucho más interesante de tendencia espacial es aquella que surge cuando la función media puede ser expresada usando covariables georreferenciadas, puesto que este tipo de modelos permite explicar más que simplemente describir la variación espacial de la variable respuesta.

Otra forma de no estacionaridad es la no estacionaridad en la estructura de la matriz de varianza covarianza, es decir, la tasa a la cual la correlación entre muestras disminuye con la distancia, depende de la dirección entre los pares de muestras analizados. A este efecto direccional en la estructura de varianza covarianza se le denomina *anisotropía geométrica*. Sin embargo, es posible transformarlo en un

proceso *isotrópico* a través de un encogimiento preferencial y de la rotación de los ejes coordenados.

El término *pepita* (“nugget”) se refiere a una discontinuidad en el origen del variograma y puede ser interpretado como el error en las estimaciones de la varianza τ^2 . En la práctica, el efecto pepita tiene doble interpretación: puede entenderse como una medida del error en las determinaciones de las variables, o como una variación espacial a una escala más pequeña que la distancia entre dos puntos sucesivos cualquiera en la malla de muestreo, o como una combinación de ambos efectos. Estos dos componentes del efecto pepita pueden ser estimados directamente, tomando medidas repetidas en ubicaciones coincidentes de la variable respuesta (Diggle y Ribeiro 2007, Schabenberger y Gotway 2005).

El modelo teórico puede ser definido como:

$$Y_i = S(x_i) + Z_i, i= 1, \dots, n$$

Donde $S(x)$ es un modelo gaussiano con media μ , varianza $\sigma^2 = \text{Var}\{S(x)\}$ y una función de correlación $\rho(u) = \text{Corr}\{S(x), S(x')\}$, para pares de puntos ubicados a una distancia u la cual disminuye cuando la distancia aumenta. Z_i es una variable aleatoria con distribución normal con media 0 y varianza τ^2 .

Un *modelo espacial gaussiano* es un modelo probabilístico que es completamente definido por su función media $\mu(x) = E[S(x)]$ y por la matriz de varianza covarianza. Un conjunto de modelos teóricos que cumplen con la anterior definición pero que además cuentan con otros parámetros que les dan mayor

flexibilidad para reunir los requerimientos de las aplicaciones a datos geoestadísticos son los modelos de la *familia Matern*, la cual cuenta con dos parámetros adicionales: un parámetro de forma k , que determina el ajuste al variograma empírico, y un parámetro de escala ϕ , que determina la tasa a la cual la correlación decae a cero. Los modelos de la *familia exponencial ponderada*, de manera similar a los de la familia Matern, tienen un parámetro de escala ϕ y un parámetro de forma k pero, en este caso el parámetro k solo puede tomar valores entre 0 y 2, lo que los hace menos flexibles. Los modelos de la *familia esférica* son ampliamente usados; cuentan con un parámetro ϕ con las dimensiones de distancia y es un grupo de modelos menos flexible que los dos anteriores (Diggle y Ribeiro 2007). Otras clases de funciones de correlación y criterios a tener en cuenta sobre la validez de las funciones candidatas, son descritas en Schabenberger y Pierre (2002). Sin embargo, Diggle y Ribeiro (2007) enfatizan en que los modelos teóricos descritos anteriormente son suficientes y pueden ser ajustados a la mayoría de situaciones geoestadísticas prácticas.

La predicción de la magnitud tomada por la variable en ubicaciones no muestreadas se conoce también como *interpolación* (Schabenberger y Gotway 2005). Un predictor óptimo, según Schabenberger y Pierce (2002) es aquel que minimiza el valor esperado del error cuadrado medio de predicción (MSPE, por sus siglas en inglés), errores obtenidos por la diferencia entre el valor predicho, usando el modelo teórico espacial y el valor real, determinado en campo. Cuando en la minimización se conoce la media, la predicción se denomina *interpolación simple*; si ésta no es conocida y es estacionaria, entonces se denomina *interpolación ordinaria*;

en caso de no ser conocida la media y presentar tendencia, entonces la predicción se denomina *interpolación universal*.

Procedimientos del análisis de imágenes. El sensoramiento remoto se entiende como la adquisición de información de un objeto sin entrar en contacto con éste, gracias a la radiación electromagnética emitida por toda sustancia u objeto por encima del cero absoluto, como resultado de oscilaciones atómicas y moleculares (Elachi y Zyl 2006). Las fuentes de radiación incidentes sobre las sustancias u objetos pueden ser naturales (el sol, la tierra, radioactividad) o artificiales (laser, radar entre otras) que al interactuar con ellos, originan una serie de procesos como: reflexión, absorción, trasmisión, luminiscencia y calentamiento, los cuales ocurren simultáneamente y sus intensidades relativas caracterizan la sustancia u objeto (Meer 2002). El tipo de datos adquiridos por sensoramiento remoto depende del tipo de información que se busca, del tamaño y dinámica de los objetos y de las características o procesos que se estudian (Figura 2.5). Por ejemplo, se puede obtener información espectral con un espectrómetro. Cuando se desea obtener información de coberturas del suelo y cartografía estructural de la superficie del suelo, se requiere de imágenes bidimensionales o perspectivas en tres dimensiones de alta resolución espacial (Elachi y Zyl 2006).

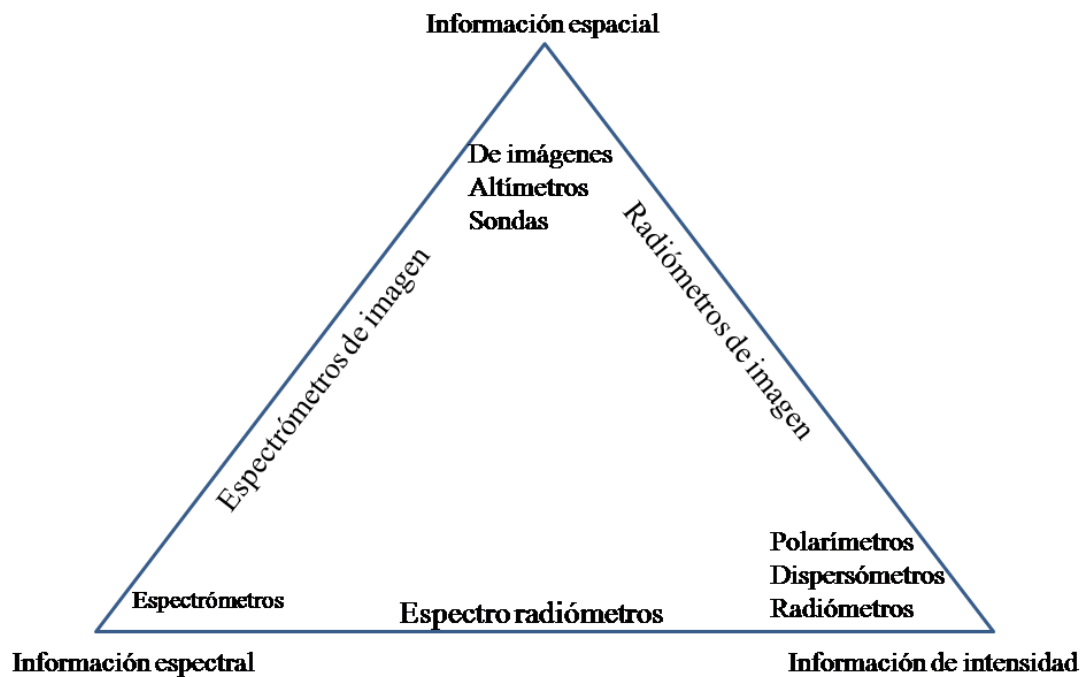


Figura 2.5. Tipos de información buscada y clase de sensores usado para adquirir esta información.

La información espacial contenida en una imagen obtenida por sensoramiento, frecuentemente es analizada con la ayuda de un SIG. El análisis de imágenes, incluye el procesamiento y la extracción de la información de interés, para lo cual se han desarrollado diferentes estrategias, descritas en Bruin y Molenaar (2002).

El resultado final del análisis de imágenes es una imagen clasificada, en la que cada categoría representa objetos del mundo real, los cuales tienen información espectral, espacial y de forma con magnitudes similares. Por ejemplo, la Figura 2.6 A consiste en una imagen aérea de baja altitud tomada a un lote de banano con una cámara digital tradicional usando las bandas RGB del espectro visible. La Figura 2.6 B es la imagen anterior clasificada en tres categorías: suelo desnudo, plantas de

banano y coberturas diferentes a las plantas de banano. Cada categoría presenta características similares de forma y de reflectancia.

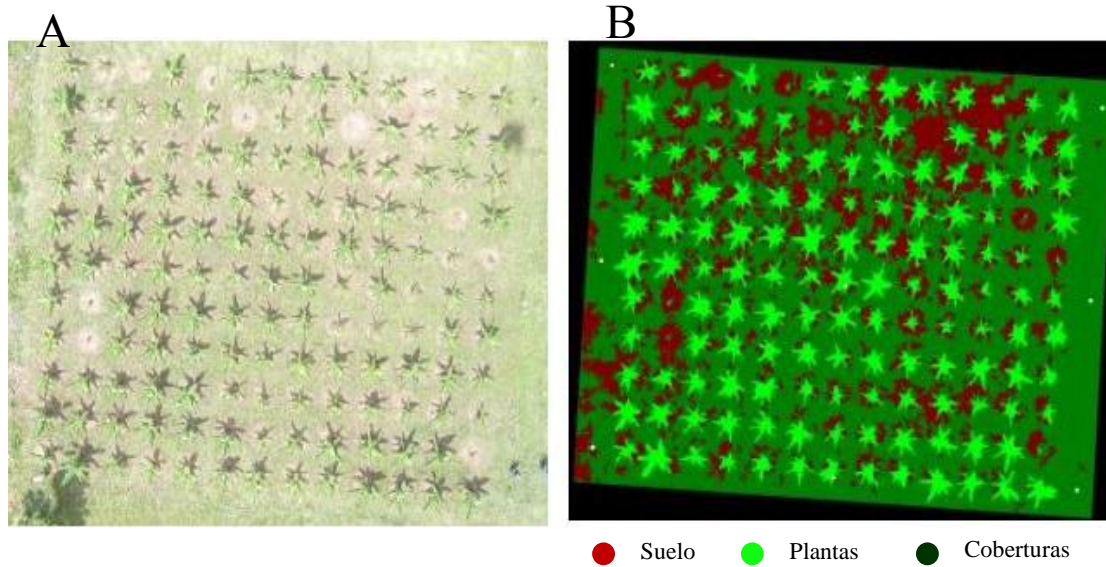


Figura 2.6. Análisis de imágenes aéreas. A, imagen de baja altitud de una parcela de banano de tres meses de plantada; B, imagen clasificada en las categorías suelo, plantas y coberturas.

La información de forma y de reflectancia puede ser usada directamente para determinar regiones de interés o ser analizada con las herramientas de la geoestadística descritas anteriormente. El volumen de trabajos publicados usando aplicaciones geoestadísticas, SIG y sensoramiento remoto de manera individual y combinada a características relacionadas con la producción en diferentes sistemas agrícolas, es enorme. Goovaerts (1998) y Goovaerts (1999) hace una revisión de las principales aplicaciones de la geoestadística para describir y modelar la variabilidad espacial de propiedades microbiológicas y físico-químicas del suelo.

Nelson *et al.* (1999) argumentan que el GPS, los sistemas de información geográfica y la geoestadística en muchas situaciones generan ventajas en el manejo de enfermedades. Sin embargo, también es posible usar los SIG y el GPS para relacionar características fisiográficas de la finca con la dispersión de una enfermedad, sin necesidad de usar la geoestadística (Munar *et al.* 2010).

Oliver (2010 b) hace una recopilación de casos de estudio de variabilidad espacial en los cuales se usaron la geoestadística, los SIG y el sensoramiento remoto aplicado a datos de producción obtenidos con monitores instalados en cosechadoras, de biomasa de plantaciones de papa obtenidos por índices de vegetación obtenidos con sensores remotos, de nematodos y de características del suelo monitoreados a través de métodos tradicionales, entre otras.

2.3.3. Diseño, implementación y evaluación: propuesta de manejo por sitio específico

Las propuestas de manejo por sitio específico se han diseñado e implementado, tradicionalmente, dividiendo el campo de cultivo en zonas más pequeñas de manejo, homogéneas en las propiedades de interés para el cultivo en su conjunto (Zhang *et al.* 2002). Normalmente se tiene conocimiento previo de los factores limitantes del cultivo y sus puntos críticos. En caso contrario, se pueden establecer relaciones espaciales entre la producción o cualquier otra variable de interés y un conjunto de factores, para así seleccionar y manejar aquellos que tienen mayor peso sobre la variable de interés (Bourenane *et al.* 2004, Castañeda *et al.* 2010).

Una zona de manejo puede ser definida como: “una porción del campo que expresa una combinación similar de los factores limitantes, para cada uno de los cuales es recomendable la aplicación de una dosis homogénea con el fin de colocarlo en esa porción, por encima del punto crítico limitante”. La definición anterior también implica que las zonas de manejo, dentro del campo de cultivo, pueden ser diferentes para diferentes factores limitantes; en este caso, cada factor debe ser manejado independientemente. Se espera que el número de zonas de manejo dentro del campo sea función de la variabilidad natural de los factores limitantes, del tamaño del campo de cultivo y de los factores de manejo (Zhang *et al.* 2002).

En la Tabla 2.2 se detallan algunos trabajos de manejo por sitio específico de la fertilización en diferentes cultivos, buscando incrementar rendimientos, reducir costos o disminuir el uso de fertilizantes. De estos trabajos se destacan tres aspectos:

- a No hay una respuesta clara y generalizada de estas variables frente a las propuestas de manejo por sitio específico realizadas.
- b La mayor cantidad de trabajos realizados de manejo por sitio específico de fertilización han sido realizados en cereales principalmente y son escasos los trabajos en cultivos tropicales perennes.
- c La variable de nutrición manejada es principalmente N, en algunas ocasiones P y K.

Tabla 2.2. Investigaciones relacionadas con manejo por sitio específico y respuesta en producción y costos en diferentes cultivos

Cultivo	Variable respuesta	Variable manejada	Co-variables	Resultado obtenido	Área	Unidad	Fuente
	Producción y costos	Nitrógeno	Labranza y rotación de cultivos, estaciones del año	No respuesta en rendimientos, ni beneficio económico	12	ha	Kahabka <i>et al.</i> (2004)
	Producción	Nitrógeno, niveles freáticos y textura	Niveles freáticos, textura, estaciones del año	Rendimientos similares entre manejos	142	ha	Van Es y Yang (2005)
Maíz	Producción y costos	N, P, K	Zonas y dos propuestas de manejo	Respuesta en rendimiento del 71% para una de las propuestas de manejo, en la segunda fue negativa en un 31%	2	ha	Rodríguez <i>et al.</i> 2008
	Producción y costos	N	Cuatro propuestas de manejo	Ganancia neta en producción entre US \$76-282 acre-1	143.3	acre	Khosla <i>et al.</i> 2009.
	Producción, cantidad de fertilizante	de N, P, K	Sub-lotes, estaciones del año	Incremento de rendimientos entre 11%, 33 según la época	18	ha	Lang <i>et al.</i> 2008
Arroz	Producción y cantidad de fertilizante	y de N	No uso	Reducción del 32 % en uso de N, incremento del 5 % de rendimiento.	- ⁽¹⁾	-	Peng <i>et al.</i> 2010.
Trigo	Producción	P, K	Tipo de suelo, estaciones del año	No respuesta en rendimientos	3	acre	Lowenberg y Aghiba 1999.
Papa	Producción	Riego	Estaciones del año	Respuesta en rendimiento entre 4% y 6 % con efecto de época	-	-	King <i>et al.</i> 2006.
Algodón	Producción y costos	Riego y N	Estaciones del año, pendiente	Respuesta a riego en época seca, respuesta a nitrógeno con incidencia de la época.	14	ha	Bronson <i>et al.</i> 2006
Vid	Producción	N, P, K	Estaciones del año	Respuesta positiva a N, no respuesta a P y respuesta negativa a K	4	ha	Davenport <i>et al.</i> 2003

⁽¹⁾No se disponía de esa información.

Además de requerirse los estudios básicos de factores limitantes de producción, de la variabilidad espacial de éstos y de experimentos de campo a pequeña escala para determinar la respuesta a las propuestas de manejo por sitio específico, la implementación a gran escala requiere de una tecnología conocida como aplicación variable de insumos o tecnología VRT (variable rate technology).

La mencionada tecnología se fundamenta en el uso de maquinaria agrícola dotada con GPS, SIG y controladores, los cuales permiten determinar la ubicación del equipo en el campo, teniendo como base los mapas con la información de requerimientos de insumos en cada sitio del campo, y variar la descarga del insumo de acuerdo a las necesidades del sitio.

La tecnología VRT se ha desarrollado para actividades de fertilización, aspersión de plaguicidas, distribución de semilla durante la siembra y riego, y es aplicada en varios sistemas de cereales, algodón y soya, principalmente en Estados Unidos y Australia (Koch y Khosla 2003).

En los sistemas agrícolas tropicales se tienen al menos dos problemas para la implementación de la tecnología VRT. En primer lugar, el desarrollo de esta tecnología en los países tropicales es bajo, con algunas excepciones en Argentina y Brasil (Bongiovanni y Lowenberg- DeBoer 2006, Roloff y Focht 2006). En segundo lugar, la adopción de la tecnología a partir de los países que ya cuentan con ésta, es limitada en algunos casos, por los costos de ellas y en otros, por las diferencias de los sistemas de cultivo y las condiciones topográficas para las cuales fueron desarrolladas.

2.4. La agricultura de precisión en el cultivo de banano

Teniendo en cuenta las etapas de la agricultura de precisión descritas puede decirse que no existe hasta el momento un caso reportado que las integre todas en el cultivo de banano. Sin embargo, sí se han reportado varios trabajos que pueden ser categorizados en una de dichas etapas. Por ejemplo, el IGAC hizo la caracterización de los tipos de suelos de la región bananera del Urabá Antioqueño (IGAC, 2007). Se realizaron los estudios básicos de variabilidad espacial de algunas propiedades químicas y físicas de los suelos bananeros determinadas de manera tradicional y se han establecido metodologías para relacionar estas propiedades con la producción (Castañeda *et al.* 2010, Hernández *et al.* 2006, Tijerino y Bizonhin 2002, Stoorvogel *et al.* 2004). También se han realizado trabajos de evaluación de la variabilidad espacial de nematodos determinados de manera tradicional (Stoorvogel *et al.* 2004) y se han asociado características fisiográficas de la finca con la dispersión y riesgo de la enfermedad del moko en banano (Munar *et al.* 2010). Además, se han caracterizado coberturas y uso de suelo en agroecosistemas bananeros usando imágenes aéreas de baja altitud (Castañeda *et al.* 2006). Una de las principales limitantes para el diseño e implementación de un programa de agricultura de precisión en el cultivo de banano es que no se cuenta con la tecnología para el monitoreo por sitio específico de la producción ni para la aplicación variable de insumos; no obstante, ésta debe ser desarrollada (Stoorvogel *et al.* 2004).

Bibliografía

1. Altan, O.; Toz, G.; Kulur, S.; Seker, D.; Volz, S.; Fritsch, D. y Sester, M. 2001. Photogrammetry and geographic information systems for quick assessment, documentation and analysis of earthquakes. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 55(5-6):359-372.
2. Auernhammer, H., and Muhr, T. 1991. GPS in a basic rule for environment protection in agriculture. In "Automated Agriculture for the 21st Century. Proceedings of the 1991 Symposium, Chicago, IL, 16-17 December," ASAE Publ (11-91, pp. 395-402. ASAE, St. Joseph, MI.
3. Arslan, S. y Colvin, T. S. 2002. Grain yield mapping: yield sensing, yield reconstruction and errors. *Precision Agriculture* 3(2):135-154.
4. Bala, S. K.; Ali, M.; Islam, A. S. 2007. Estimation of potato yield in and around Munshingonj using remote sensing and GIS techniques. *International Conference on water y Flood Management, Dhaka, Bangladesh*, p 421-430. Ben-Dor, E. 2002. Quantitative remote sensing of soil properties. *Advances in Agronomy*, 75: 173-243.
5. Ben-Dor, E. 2002. Quantitative remote sensing of soil properties. *Advances in Agronomy*, 75: 173-243.
6. Bongiovanni y Lowenberg- DeBoer 2006. Argentina p. 615-634. Sirinivasan, A. *Hand book of precision agriculture: principles and application*. New York: Food Product Press, 635 p.
7. Bourennane, H.; Nocoullaud, B; Couturier, A. y Kig, D. 2004. Exploring the spatial relationships between some soil properties and wheat yields in two soil types. *Precision Agriculture*, 5:521-536.
8. Bronson, K.F.; Booker, J.D.; Bordovsky, J.P.; Keeling, J.W.; Wheeler, T.A.; Boman, R.K.; Parajulee, M.N.; Segarra, E. y Nichols, R.L. 2006. Site-Specific irrigation and nitrogen management for cotton production in the southern high plains. *Agronomy Journal*, 98:212-219.
9. Bruin, S. y Molenaar, M. 2002. Remote sensing and geographical information systems, p 41-54. Stein, A. Meer, F. y Gorte, B. *Remote sensing and digital image processing, spatial statistics for remote sensing*. New York: Kluwer Academic Publishers, 284 p.
10. Cai, X. y Sharma, B. R. 2009. Integrating remote sensing, census and weather data for an assessment of rice yield, water consumption and water productivity in the Indo-Gangetic river basin. *Agricultural Water Management*, 97(2):309-316.

11. Castañeda, S.D.A. 2005. Estudio de los cambios espaciales y temporales durante el crecimiento de las plantas de banano empleando fotografías aéreas de alta resolución. MSc Thesis. Universidad Nacional de Colombia, 134 p.
12. Castañeda, S.D.A.; Montoya, G.R.Y. y Escobar, C.C.A. 2006. Prototipo de un sistema integrado digital para la clasificación de coberturas y usos de la tierra a nivel de finca bananera. *Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín*, 59(1):3167-3199.
13. Castañeda, S.D.A.; Jaramillo, J.D.F. y Cotes, T.J.M. 2010. Componentes de la variabilidad espacial en el manejo por sitio específico en banano. *Pesquisa Agropecuaria Brasileira*, 45(8):1-10.
14. Davenport, J.R.; Marden, J.M.; Mills, L.J. y Hattendorf, M.J.: 2003. Response of concord grape to variable rate nutrient management. *American Journal of Enology and Viticultura*, 54(4):286-293
15. Diggle, P. J. y Ribeiro, Jr. P. 2007. *Model-based geostatistics*. New York: Springer, Series in statistics, 228 p.
16. Du, X.; Wu; B.; Li, Q.; Meng, J. Jia, K. 2009. A method to estimated Winter wheat yield with the MERIS data. *Proceedings in Progress In Electromagnetic Research Symposium*, Beijing, China, p. 1392:1395.
17. Elachi, C. y Zyl, J. 2006. *Introduction to the physics and techniques of remote sensing*, Second edition. New Jersey: John Wiley y Sons, Inc, 556 p.
18. Garrott, R.; White, G.; Bartmann, R. M. y Weybright, D. 1986. Reflected signal bias in biotelemetry triangulation systems. *The Journal of Wildlife Management*, 50(4):747-752.
19. Goovaerts, P. 1999. Geostatistics in soil science: state-of - the- art and perspectives. *Geoderma*, 89(1-2):1-45.
20. Goovaerts, P. 1998. Geostatistical tools for characterizing the spatial variability of the microbiological and physic-chemical soil properties. *Biology and Fertility of the Soils*, 27(4):315-334.
21. Hann, F. 2009. Actual pathogen: sensors and algorithms. *Algorithms*, 2:301-338.
22. Hernandez, C. A.; Barrera, W. A.; Spaans, E. y Vaquer, R. 2006. Agricultura de precisión en la empresa agrocomercial Earth: Fertilización dinámica. *Tierra Tropical*, 2(2):177-185.

23. Instituto Geográfico Agustín Codazzi –IGAC- 2007. Estudio semidetallado de suelos de las áreas potencialmente agrícolas, Urabá departamento de Antioquia. Ed. IGAC, Bogotá, 439 p.
24. Jensen, A.L.; Boll, P. S.; Thysen, I. y Pathack, B. K. 2000. PI@nteinfo-A web based system for personalized decision support in crop management. *Computers and Electronics in Agriculture* 25:271-293.
25. Kahabka, J.E.; Van Es, H.M.; McClenahan, E.J. y Cox, W.J: 2004. Spatial analysis of maize response to nitrogen fertilizer in Central New York. *Precision Agriculture*, 5:463-476.
26. King, B.A.; Stark, J.C. y Wall, R.W.2006. Comparison of site-specific and conventional uniform irrigation management for potatoes. *Applied Engineering in agriculture*, 22(5):677-688.
27. Koch, B. y Khosla, R. 2003. The role of precision agriculture in crop systems. *Journal of Crop Production* 9 (1/2):361-381.
28. Khosla, R.; Fraiser, W.M.; Westfall, D.G. y Kock, B. 2009. Economics of fertilization, under site-specific management zones. *Western Nutrient Management Conference*, Salt City, UT, 8:4-9.
29. Lang, T.; Zhang, S.; Li, W.; Hoffman, W.C. y Ma, C. 2008. Variable rate fertilization, for maize and its effects based on the site-specifics soil fertility and yield. *Agricultural Engineering Internacional: the CIGR Ejournal*, 10: 1-10
30. Lan, Y.; Thomson, S.J.; Huang, Y.; Hoffmann, W.C. y Zhang, H. 2009. Current status and future directions of precision aerial application for site-specific crop management in USA. *Computers And Electronics in Agrculture*, 74(1):34-38.
31. Lee, W.S.; Alchanatis, V.; Yang, C.; Hirafuji,, M.; Moshou, D. y Li, C. 2010. Sensing technologies for precision specialty crop production. *Computers and Electronics in Agriculture*, 74 (1):2-33.
32. Longley, P. A.; Goodchild, M.F.; Maguire, D.J. y Rhind, D. W. 2005. *Geographical information systems and science*. 2nd Edition. West Sussex, England: John Wiley y Sons Ltd, 517 p.
33. Lowenberg-DeBoer, J. And Aghib, A. 1999. Average returns and risk characteristics of site-specific P and K management: Eastern cornbelt on farm trial results. *Journal of Production Agriculture* 12: 276-282.
34. Magalhães, P. S. G. y Cerri, D. G. P. 2007. Yield monitoring of sugar cane. *Biosystems Engineering*, 96 (1):1-6.

35. Martin, P.; Zarco-Tejada, P.J.; Gonzalez, M.R. y Berjon, A. 2007. Using hyperspectral remote sensing to map grape quality in Tempranillo vineyards affected by iron deficiency chlorosis. *Vitis*, 46 (1): 7-14.
36. Matheron, G. (1963). Principles of geostatistics. *Economic Geology*, 58, 1246–1266.
37. McBratney, A. B.; Whelan, B. y Ancev, T. 2005. Future directions of precision Agriculture. *Precision Agriculture*, 6:7-23.
38. Meer, F. 2002. Physical principles of optical remote sensing, p 27-40. Stein, A. Meer, F. y Gorte, B. Remote sensing and digital image processing, spatial statistics for remote sensing. New York: Kluwer Academic Publishers, 284 p.
39. Mulder, M. A. 1987. Remote sensing in soil science, development in soil science. New York: Elsevier Science Publishing Company INC, 379 p.
40. Mulla, D. J. y Hammond, M. W. 1988. Mapping soil test results from large irrigation circles. Jacobsen, J.S. (Ed). Proceedings of the 39th Annual Far West Regional Fertilizer Conference, p. 169-171.
41. Munar, V. O; Morales, O.J.G y Castañeda, S. D. A. 2010. Use of field-integrated information in GIS-based maps to evaluate moko disease (*Ralstonia solanacearum*) in banana growing farms in Colombia. *Crop Protection*, 29:936-941.
42. National Research Council. 1997. Precision agriculture in the 21st century. Washington DC, USA: National Academy Press, p 41.
43. Nelson, M. R.; Orum, T. V.; Jaime-García y Nadeem, A. 1999. Applications of geographic information systems and geostatistics in plant disease epidemiology and management. *Plant Disease*, 83(4):308-319.
44. Oberthür, T.; Cock, J.; Anderson, M. S. Naranjo, R. N.; Castañeda, D. y Blair, M. 2007. Acquisition of low altitude digital imagery for local monitoring and management of genetics resources. *Computers and Electronics in Agriculture*, 58: 60-77.
45. Oliver, M. A. 2010 a. An overview of geostatistics and precision agriculture, p. 1-34. Oliver, M. A. Geostatistical applications for precision agriculture, London: Springer, 337 p.
46. Oliver, M. A. 2010 b. Geostatistical applications for precision agriculture, London: Springer, 337 p.

47. Oudemans, P. V.; Pozdnyakova, L.; Hughes, M. G. y Rahman, F. 2002. GIS remote sensing, for detecting yield loss in cranberry culture *Journal of Nematology*, 34(3):207-212.
48. Passioura, J. B. 2002. Environmental biology and crop improvement. *Functional Plant Biology*, 29 (5)537-546.
49. Pelletier, G. y Upadhyaya, S. K. 1999. Development of a tomato load/yield monitor. *Computer and Electronics in Agriculture*, 23(2):103-107.
50. Peng, S.; Buresh, R.J.; Huang, J.; Zhong, X.; Zou, Y.; Yang, J.; Wang, G.; Liu, Y.; Hu, R.; Tang, Q.; Cui, K.; Zhang, F. y Doberman, A. 2010. Improving nitrogen fertilization in rice by site-specific N Management. A review. *Agronomy Journal*, 30 (3):649-656.
51. Perez-Muñoz, F. y Colvin, T. S. 1996. Continuous grain yield monitor. *Transactions of the American Society of Agricultural and Biological Engineers*. 39(3): 775-783.
52. Pierce, F. y Nowak, N. 1999. Aspects of precision agriculture. *Advances in Agronomy*, 67:1-67.
53. Powell, S. L.; Pflugmacher, D.; Kirschbauma, A. A.; Kim, Y. y Cohen, W. B. 2007. *Journal of Applied Remote Sensing*, 1:16.
54. Prasad, A. K.; Chai, L. Singh, R. P. y Kafatos, M. 2005. Crop yield estimation model fo Iowa using remote sensing, and surface parameters. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 8: 26-33.
55. Pringle, M. J.; Cook, S. E. y McBratney A. B. 2005. Field-scale experiments for site-specific crop management. Part I: design considerations. *Precision Agriculture*, 5:617-624.
56. Pringle, M. J.; McBratney A. B.; Whelan, B. M. y Taylor, J. A. 2003. A preliminary approach to assessing the opportunity of site-specific crop management in a field, using yield monitor data. *Agricultural systems*, 76(1):273-292.
57. Rodríguez, J.; González, A.M.; Leiva, F.R. y Guerrero, L: 2008. Fertilización por sitio específico en un cultivo de maíz, (*Zea mays* L.) en la sabana de Bogotá. *Agronomía Colombiana*, 26(2):308-321.
58. Rolof, G. y Focht, D. 2006. Brazil p. 635-656. Sirinivasan, A. *Hand book of precision agriculture: principles and application*. New York: Food Product Press, 635 p.

59. Santos, S. M.; Vieira, R. J. y Camargo, L. C. A. 2005. Spectral variables, growth analysis, and yield of sugarcane. *Scientia Agrícola*. (Piracicaba, Brazil) 62 (3): 199-207.
60. Saraswat, D. 2007. Geospatial technology applications to strawberry, grape and citrus production systems. Tesis of Doctor of Philosophy, Ohio State University, 280 p.
61. Sartori, S.; Fava, J. F. M.; Domingues, E. L.; Ribeiro, F. A. C. y Shiraisi, L. E. 2003. Mapping the spatial variability of coffee yield with mechanical harvester. *Proceedings of the World's Congress of Computers in Agriculture and Natural Resources*, Iguacu, Brazil, p. 196-205.
62. Schabenberger, O. y Gotway, C. 2005. *Statistical methods for spatial data analysis.*, New York: Chapman y Hall CRC, 465 p.
63. Schabenberger, O. y Pierce, F. J. 2002. *Contemporary statistical model for the plant and soil sciences.* New York: CRC Press, 737 p.
64. Schowengerdt 2007. *Remote sensing, models and methods for image processing.* Boston, Elsevier, 515 p.
65. Schenk, T. 1998. Towards automatic aerial triangulation. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 52 (3):110-121.
66. Sirinivasan, A. 2006. Precisión Agriculture: an overview, p 3-18. Sirinivasan, A. *Hand book of precision agriculture: principles and application.* New York: Food Product Press, 635 p.
67. Sommer, S.; Hill, J. y Méger, J. 1998. The potential of remote sensing for monitoring rural land use changes, and their effects on soil conditions. *Agriculture, Ecosystems y Environment*, 67 (2-3):197-209.
68. Soria-Ruiz, J.; Fernandez-Ordoñez, Y.; y Granados-Ramirez, R. 2004. Methodology, for prediction of corn yield using remote sensing satellite data in Central Mexico. *Investigaciones Geográficas*, 5:61-78.
69. Stafford, J. V. 2002. Implementing precision agriculture in the 21st century. *Journal of Agricultural Engineering Research*. 76(3):267-275.
70. Stafford, J. V., LeBars, J. M., and Ambler, B. 1996. A hand-held data logger with integral GPS for producing weed maps by field walking. *Computers and Electronics in Agriculture*, 14: 235-247.

71. Stoorvogel, J. J.; Bouma, J. y Orlich, R. A. 2004. Participatory research for systems analysis: prototyping for Costa Rican banana plantation. *Agronomy Journal*, 96(2):323-336.
72. Thenkabil, P.; Smith, R. B. y Pauw, E. 2000. Hyperspectral vegetation indices and their relationships with agricultural crop characteristics. *Remote Sensing Environmental*, 71: 158-182.
73. Theodor, R. B. F. y Teixeira, B. G. 1990. Yield stimation of sugarcane based on agrometeorological-spectral models. *Remote Sensing of Enviroment*, 33 (3): 183-192.
74. Thunnisen, H.A.M.; Jaarma, M.N. y Schoumans, O. F. 1992. Land cover inventory in the Netherlands using remote sensing; application in a soil and groundwater vulnerability assessment system. *International Journal of Remote Sensing*, 33 (9): 1693-1708.
75. Tijerino, P. J. M. y Bizonhin, C. 2002. Agricultura de precisión en banano (*Musa AAA*); una herramienta para la toma de decisiones acertadas. Trabajo de Graduación. Ingeniería Agronómica. Universidad Earth. Guácimo. Costa Rica. 52 p.
76. Tumbo, S. D. Whitney, J. D. Miller, W. M. y Wheaton, T. A. 2002. Development and testing, of a citrus yield monitor. *Amerincan Society of Agricultural Engineers*, 18(4):399-403.
77. Van Es, H.M.; Yang, C.L. 2005. Maize nitrogen response as affected by soil type and drainage variability. *Precision Agriculture*, 6:281-295
78. Vellidis, G.; Perry, C. D.; Rains, G. C. Thomas, D. L.; Wells, N. y Kvien, C. K. 2003. Simultaneous assessment of cotton yield monitor. *Applied Engineering in Agriculture*, 19 (3):259-272.
79. Vellidis, G.; Perry, C. D.; Durrence, J. S.; Thomas, D. L.; Hill, R. W.; Kvien, C. K.; Hamrita, T. K.; Rains, G. 2001. The peanut yield monitoring system. *Transactions of the American Society of Agricultural and Biological Engineers*, 44 (4):775-785.
80. Weissteiner, C. J. y Kühbauch, W. 2005. Regional Yield Forecasts of Malting Barley (*Hordeum vulgare L.*) by NOAA-AVHRR Remote Sensing Data and Ancillary Data. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 4 (4):308-320.
81. West, J. S.; Bravo, C.; Oberti, R.; Lemaire, D.; Moshou, D. y McCartney, H. A. 2003. The potential of optical canopy measurements for targeted control of field crop diseases. *Annual Review of Phytopathology*, 41:593-614.

82. Wright, D. L.; Ramsey, R. D.; Baker, D. J. y Rasmussen, V. P. 2003. A comparison of two geospatial technologies in no-uniform wheat fields: yields monitors, and remote sensing. ASPRS, Annual Conference proceedings, Alaska, 8 p.
83. Yadav, I.S.; N.K. Srinivasa; R. N.K.; Reddy, B.M.C.; Rawal, R.D.; Srinivasan, V.R.; Sujatha, N.T; Chaithali; B.; Nageswara, R. P.P.; Ramesh, K.S.; Elango, S. 2002. Acreage and production estimation of mango orchards, using using Indian Remote Sensing (IRS) satellite data. *Scientia Horticulturae*, 93(2):105-123.
84. Yang, X.; Sun, H. Tan, Z. y Ding, M. 2009. Extraction of remote sensing information of banana under support of 3s technology inguangi province. *IFIP International Federation for Information for Processing*, 1: 293-298.
85. Ye, X.; Sakai, K.; Ortega G. L.; Asada, S.; Sasao, A. 2006. Estimation of citrus, yield from airborne, hyperspectral images using a neural network model. *Ecological Modelling*, 198 (3-4): 426-432.
86. Zhang, N.; Wang, M. y Wang, N. 2002. Precision agriculture a worldwide overview. *Computers and Electronics in Agriculture*, 36:113-132.

3. Variabilidad espacial de propiedades del suelo relacionadas con la producción de banano

Spatial variability of soil properties related with banana production

Resumen

Se evaluaron diversos métodos para seleccionar propiedades del suelo explicativas de la producción de banano, y se escogió aquel que seleccionó el menor número de propiedades conservando una buena precisión de predicción.

Se determinaron quince propiedades químicas y diez y nueve físicas del suelo, así como la cantidad de raíz funcional de la planta y el peso del racimo, en 130 sitios, correspondientes a igual número de plantas, distribuidos en una malla regular con celdas de 20 x 20 m en tres lotes de manejo de la finca. La selección de las propiedades del suelo relacionadas con la producción se realizó así: 1) Descomponiendo la variabilidad de la producción por fuentes y seleccionando las propiedades por mínimos cuadrados y 2) Evaluando ocho métodos de regresión para

la selección de variables. Las estrategias se evaluaron tanto a nivel de toda el área experimental como de cada lote. Las propiedades relacionadas se caracterizaron espacialmente y para cada una de estas, se construyó por interpolación un mapa de requerimientos. En la estrategia 1), la variabilidad de la producción se expresó por grupos de variables del suelo que se relacionaron significativamente y explicaron más del 69 % del peso de los racimos de banano dentro de cada lote, pero se requiere de un alto número de propiedades. La estrategia 2) permitió establecer que el método Lasso fué un método preciso (RMSPD = 6.28-6.91) y parsimonioso (4-7 variables promedio relacionadas con la producción) tanto con muestras pequeñas como grandes. La validación cruzada indicó que, a nivel de todo el campo experimental se requieren, en promedio, siete propiedades del suelo para explicar la producción, de las cuales DPMS tuvo una dependencia espacial fuerte y presentó la mayor relación con producción; el aluminio, el cobre y la arena presentaron una dependencia espacial media.

Términos para indexación: métodos de regresión, interpolación, geoestadística, agricultura de precisión, validación cruzada.

Abstract

Several variable selection methods were evaluated to establish which soil properties are related with banana production, and was selected this with minor number of soil properties preserving a good precision of prediction.

Fifteen chemical properties, nineteen physical variables, as quantity of functional root and the weight of the banana bunch were evaluated, in 130 sites,

corresponding to an equal number of plants, distributed into a regular grid with cells of 20 x 20 m. The selection of soil properties related to the banana production was made: 1) Decomposing the variability of production by source and selecting the soil properties by least square and, 2) Evaluating eight regression methods to variables selection. The strategies were evaluated both by whole experimental field as by plot. The soil properties selected were characterized spatially and each for this one, was constructed map of requirements.

In the strategy 1), the variability of production allowed to express themselves in groups of soil properties that are significantly related and explain (> 69 %) of the banana bunch weight, within each plot, but was required one height number of the properties. The strategy 2) allowed to found that the Lasso method was an accurate (RMSPD = 6.28-6.91) and parsimoniously (4-7 variables average) method, for both small and large samples. The cross validation indicated that a wide experimental field, it takes on average seven variables, which of this DPMS had a strong spatial dependence and had the closest relationship to production. Aluminum, copper and sand have a medium spatial dependence.

Keywords: regression methods, krigging, geostatistics, precision agriculture, cross-validation, spatial autocorrelation.

3.1. Introducción

El clima y el suelo determinan el éxito de la producción en las fincas bananeras. Para Vaquero (2003), la textura, la compactación y el drenaje son las propiedades físicas del suelo que tienen mayor influencia en el crecimiento y desarrollo de la planta de banano, ya que pueden limitar la profundidad efectiva, el suministro de agua y la aireación en la rizosfera.

Las características de los suelos bajo alta saturación con agua, permanente o temporal, limitan el crecimiento y causan necrosis y pudrición de la raíz. Según Gauggel *et al.* (2003), también es reconocida la importancia de las relaciones entre las propiedades químicas del suelo y el sistema radical de la planta de banano, aunque no se comprenden completamente y su impacto económico no ha sido adecuadamente estimado debido a la complejidad de sus múltiples componentes.

A los productores les interesa conocer la eficiencia productiva de cada uno de los lotes de su finca, así como poder identificar las causas de las diferencias de productividad observadas entre ellos. La relación espacial entre la producción y las propiedades del suelo se ha explorado en cultivos como maíz, papa, trigo, pastos (Miao *et al.* 2006, Persson *et al.* 2005, Van Es *et al.* 2005, Arango 2004, Bourennane *et al.* 2004 y Kahabka *et al.* 2004), lo que ha permitido identificar las variables edáficas que han tenido mayor impacto en la producción de cada lote, y a través del análisis espacial se han podido delimitar zonas de manejo diferente para cada

variable, estrategia conocida como Manejo por Sitio Específico, que ha mostrado ser amigable con el ambiente puesto que permite optimizar el uso de los insumos.

Como son muchas las variables que se relacionan con la producción de los cultivos y no todas tienen la misma relevancia en esa relación, en el presente trabajo se pretende encontrar un método que permita seleccionar una pequeña cantidad de variables edáficas que se relacionen bien con la producción de banano, de modo que se pueda tener como filtro que ayude en la definición de prácticas de manejo por sitio específico en dicho cultivo. Para lograr este propósito se evaluaron 15 propiedades químicas y 19 físicas del suelo, así como la cantidad de raíz funcional de la planta, que luego se relacionaron con la producción, en términos de peso del racimo producido por la planta.

Las variables que más se relacionaron se caracterizaron geoestadísticamente, con lo que se generaron modelos que permitieron conocer y representar su distribución espacial en las áreas estudiadas.

3.2. Materiales y metodología

La investigación se desarrolló en una parcela de 6 ha sembrada en cuadro a 2.5 m con el clon de banano Williams (*Cavendish* AAA) desde el año 2005, perteneciente al Campo Experimental de Augura (36 ha), situado al occidente del municipio de Carepa departamento de Antioquia, Colombia (Figura 3.1A).

El campo se ubica en la llanura aluvial de piedemonte de la serranía de Abibe, tiene un relieve plano (pendiente <3%), una altura sobre el nivel del mar de 40 m y una temperatura promedio anual de 28 °C.

Según Gutiérrez (2007), en la parcela se presentan tres consociaciones de suelos: la Consociación Fluventic Eutrudepts fina (A), la Consociación Fluvaquentic Eutrudepts franca fina (B) y la Consociación Vertic Endoaquepts franca fina (C). Además, de acuerdo con el ordenamiento de la finca, la parcela la componen tres lotes de manejo identificados como: L3, L4 y L5 (Figura 3.1B).

En la parcela experimental se seleccionaron 130 plantas (unidades productivas) en una malla regular con una cuadrícula de 20 x 20 m, distribuidas en los tres lotes así: 48 en el L1, 42 en el L2 y 40 en el L3 (Figura 3.1B). Cada una de las plantas seleccionadas fue georreferenciada empleando un GPS Trimble GeoXT estandarizado bajo el sistema de proyección UTM WGS84, zona 18 N. La población de plantas de la tercera generación en cada unidad productiva fue homogenizada seleccionando yemas de la primera corona del cormo con un tamaño menor a 5 cm de altura y eliminando las demás.

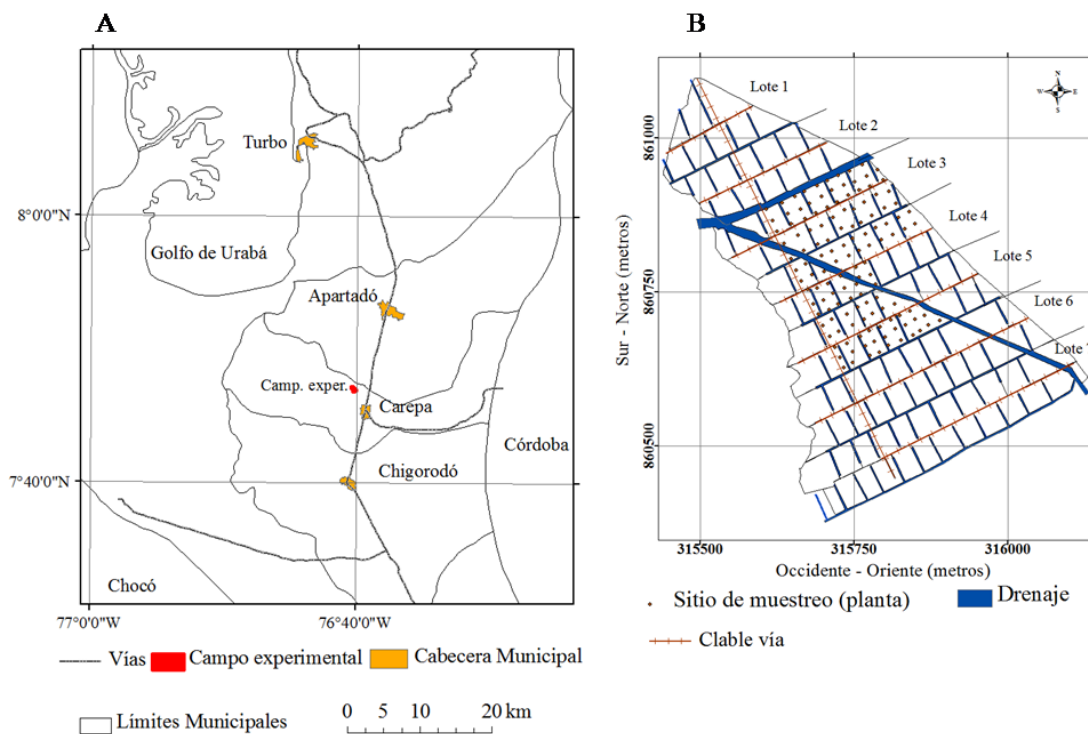


Figura 3.1. Mapas geográficos. A, Ubicación del campo experimental respecto a los municipios de la región bananera de Urabá, Colombia (coordenadas geográficas); B, Diseño agronómico del cultivo en el campo experimental de Augura (coordenadas planas: UTM WGS84 zona 18 N).

3.2.1. Propiedades determinadas

La población de plantas seleccionadas se llevó hasta producción registrándose, para cada una de ellas, el peso total del racimo producido en kg (PR). Cuando floreció el 50 % de las plantas se tomaron las muestras del suelo y se determinaron 18 propiedades físicas y 15 químicas en él. Además, se evaluó la cantidad de raíz funcional en cada planta. El muestreo y las condiciones en que se tomaron las muestras para cada variable, las determinaciones hechas y los métodos utilizados para hacerlas, se presentan en la Tabla 3.1.

Tabla 3.1. Muestreo, determinaciones, y métodos de evaluación de propiedades físicas, químicas y de raíz funcional evaluadas en el campo experimental de Augura, Carepa, Colombia.

Propiedad	Método
Físicas	
Resistencia superficial a la penetración (kg cm^{-2}) determinada a 30, 60 y 100 cm de la planta: CP30, CP60, CP100, respectivamente.	Penetrómetro de bolsillo
Densidad aparente superficial, a 30 cm de la planta (Da).	Cilindro biselado
Índices de estabilidad estructural, evaluados sobre una muestra sin disturbar, tomada a 30 cm de la planta	
Diámetro ponderado medio, en mm, determinado en seco y húmedo (DPMS y DPMH).	
Índice de estructuración (%) determinado en seco y húmedo (IES, IEH).	Tamizado en seco y agua según métodos descritos en Jaramillo (2002)
Agregados finos (<0.5 mm) en (%) determinados en seco (AFS) y húmedo (AFH).	
Agregados extremos (> 2 mm y < 0.5 mm de diámetro) (%) determinados en seco (AES) y en húmedo, (AEH).	
Índices de humedad, evaluados sobre una muestra tomada a 30 cm de la planta	
Retención de humedad gravimétrica a capacidad de campo (0.3 atm), y en el punto de marchitez permanente (15 atm): H0.3, H15, respectivamente.	Desorción de humedad en platos y ollas de presión con oxígeno.
Textura , evaluada sobre una muestra compuesta de cuatro submuestras tomadas en forma ortogonal a 30 cm de la planta y entre 0 y 20 cm de profundidad de esta. Contenido de arena (A), limo (L) y arcilla (Ar), en %. Arcilla dispersa (ArD) y coeficiente de dispersión (CD) expresadas en % [$\text{CD} = \text{ArD}/\text{Ar} * 100$].	La A, el L, y la Ar determinadas por el método de Bouyoucos (IGAC 2006). La ArD, determinada por el método de la pipeta (Jaramillo 2002).
Químicas	
Evaluadas sobre una muestra compuesta de cuatro submuestras tomadas en forma ortogonal a 30 cm de la planta y entre 0 y 20 cm de profundidad.	
pH determinado en agua 1:1.	
Contenido de materia orgánica (MO) expresada en %.	Walkley-Black (IGAC 2006).
Capacidad de intercambio catiónico efectiva (CICE) y a pH 7 (CIC7), expresadas en $\text{cmol}(+) \text{kg}^{-1}$ suelo.	CICE, método suma de cationes. CIC7, método del Acetato de amonio 1N y neutro (IGAC 2006).
Contenidos intercambiables de Ca, Mg, K y Al, expresados en $\text{cmol}(+) \text{kg}^{-1}$ suelo.	Ca, Mg, K, extraídos con acetato de amonio 1M y neutro. Al, extraído con KCl, (IGAC 2006).
Contenidos disponibles de P, S, Fe, Mn, Cu, Zn y B, expresadas en mg kg^{-1} suelo.	P: Bray II. S: fosfato monocalcico 0.008M. Fe, Mn, Cu, Zn: Olsen modificado. B: Agua caliente, (IGAC 2006).
Raíz funcional (RF), expresada en porcentaje.	Método de la cajuela, descrito en Araya y Calvo (2001).

3.2.2. Análisis estadísticos

Los análisis estadísticos de la información recolectada se realizaron en cinco etapas.

En la primera etapa, se hizo el análisis descriptivo de todas las propiedades evaluadas. La inferencia acerca de la homogeneidad de varianzas y de promedios, para la producción, se efectuó por pares de grupos formados por los lotes y por las unidades de suelo, usando pruebas de F y T, respectivamente, con un nivel de confianza del 95 %.

En la segunda etapa, se evaluó la tendencia espacial de la producción, según la metodología de Diggle y Ribeiro (2007), relacionando el peso de los racimos con los ejes coordenados así como con las propiedades del suelo a nivel de todo el campo experimental, a nivel de unidad de suelo y a nivel de lote.

Se aclara que el lote L4 es atravesado diagonalmente por un canal de drenaje primario, por lo que este lote se dividió en dos, el L4A y el L4B, sólo para la exploración de la tendencia. Al final se obtuvo un modelo lineal general completo en el cual la variabilidad de la producción se descompuso de manera aditiva por fuentes, así: la variación debida a los lotes y la variación debida a las propiedades significativas dentro de cada lote.

La dependencia espacial del peso de los racimos, con tendencia y sin ésta, extrayéndola con el modelo general encontrado, se evaluó para todo el campo (n=130), usando el variograma en las siguientes direcciones: omnidireccional y para

los ángulos de 0°, 30°, 60° y 90° (Diggle y Ribeiro 2007, Lark 2002). Posteriormente se corrigió la anisotropía transformando los ejes de acuerdo con el ángulo y la relación de anisotropía encontrada y usando la función de transformación geométrica implementada en el paquete GeoR (Ribeiro y Diggle, 2001).

En la tercera etapa, se buscó un modelo de regresión lineal que permitiera seleccionar un conjunto pequeño de propiedades del suelo capaz de predecir la producción con la mayor precisión. Se evaluaron ocho métodos para seleccionar las propiedades del suelo que se relacionaron linealmente con el peso de los racimos de banano en cada lote, así como en toda el área de investigación, lo que implicó diferentes tamaños de muestra. Las propiedades del suelo se estandarizaron, para evitar efectos de magnitud debido a las diferentes unidades de medición.

El modelo de regresión lineal usado cuenta con un vector de variables explicativas $X^T = (X_1, X_2, \dots, X_p)$, con las cuales se espera predecir la variable respuesta Y . El modelo de regresión tiene la forma:

$$\hat{Y} = \beta_0 + \sum_{j=1}^p X_j \beta_j$$

Donde, \hat{Y} es la variable respuesta Y predicha, el β_0 y los β_j son el intercepto y los coeficientes de las variables explicativas respectivamente, los cuales son desconocidos y deben ser estimados, procedimiento detallado en Montgomery (2001).

El modelo asume que la función de regresión es lineal o es una aproximación razonablemente lineal y que las variables explicativas son cuantitativas. El modelo permite transformaciones cuantitativas de las variables, tales como: logarítmicas, raíz cuadrada, potencias cuadradas, entre otras. Las variables explicativas también pueden expandirse mediante representaciones polinómicas, siendo las de primero y segundo grado las más usadas; se permite también la interacción entre variables. Finalmente, las variables explicativas se pueden agrupar de acuerdo a un factor con diferentes niveles, estableciendo el efecto de cada uno de estos, sobre el grupo de variables significativas dentro de cada nivel.

Los métodos de selección del intercepto y coeficientes de las propiedades fueron:

Ajuste por Mínimos Cuadrados Ordinarios (OLS).

El método se basa en seleccionar los coeficientes $\beta = (\beta_0, \beta_1, \beta_2, \dots, \beta_p)^T$, que minimizan la suma de cuadrados de los residuales (RSS).

$$RSS = \sum_{i=1}^N (y_i - \hat{y}_i)^2 = \sum_{i=1}^N (y_i - \beta_0 - \sum_{j=1}^p X_{ij} \beta_j)^2$$

Donde, y_i : es la i -ésima observación de la variable respuesta, \hat{y}_i : es la i -ésima estimación de y , β_0 : es el intercepto, x_{ij} : es la i -ésima observación de la j -ésima variable explicativa, y β_j : es el coeficiente de la j -ésima variable explicativa, p : son las variables explicativas.

Selección por Pasos hacia Adelante y hacia Atrás (Forward and Backward Step Wise), usando el Criterio de Información de Akaike (STEP AIC) para la selección del modelo.

El método se fundamenta en el criterio de información de Akaike (AIC por sus siglas en inglés), para modelos paramétricos ajustados y es definido por el R Development Core Team (2009), como:

$$AIC = -2 \log(L) + k \cdot \text{edf}$$

Donde, log: es el logaritmo, L: es la verosimilitud, k: es un parámetro de ponderación y edf: grados de libertad del modelo.

El procedimiento por pasos hacia adelante y hacia atrás consiste en estimar el criterio AIC, tanto para el modelo sin variables explicativas, es decir para el intercepto, como con todas ellas. En cada ciclo y de manera repetida se adiciona una variable y se quita una a los dos modelos anteriores respectivamente, estimando para cada nuevo modelo el criterio AIC y así sucesivamente en cada ciclo hasta encontrar el modelo con el menor AIC. Para mayor detalle acerca de la fundamentación estadística del criterio AIC consultar Miller (2002).

Método de regresión de Avance por Etapas (Forward Stagewise).

El procedimiento en este método inicia de manera similar al del método de selección por pasos hacia adelante, elaborando un modelo general con un intercepto ($\bar{y} = \beta_0$), y centrando los coeficientes de todas las variables explicativas en cero ($\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_p = 0$). En cada ciclo, se construye un modelo de regresión lineal simple

parcial entre los residuales y la variable explicativa (x_j) más correlacionada con éstos y se obtiene el coeficiente (β_j), el cual es sumado al respectivo coeficiente de esa variable en el modelo general. El proceso continúa hasta que ninguna de las variables se correlacione con los residuales. El procedimiento permite un número de ciclos mayor al número de variables explicativas, puesto que, una variable explicativa puede presentar la mayor correlación con los residuales en más de un ciclo (Hastie *et al.* 2008).

Tres métodos de encogimiento: Arista de regresión (Ridge Regresion), Lasso y Mínimo Ángulo de Regresión (Lar).

El procedimiento en el método de encogimiento *Arista de regresión* selecciona aquellos β que minimizan la suma de cuadrados de los residuales, como en el método OLS, pero además la suma de los cuadrados de los coeficientes (β), excluyendo el intercepto (β_0), debe ser menor que un parámetro de penalización (t). El procedimiento en cada ciclo hace que la magnitud de los coeficientes sea menor y tienda a cerco. El método puede ser representado como:

$$\hat{\beta}^{\text{arista}} = \underset{\beta}{\text{Argmin}} \left\{ \sum_{i=1}^N (y_i - \beta_0 - \sum_{j=1}^p X_{ij} + \beta_j)^2 \right\}$$

Sujeto a que,

$$\sum_{j=1}^p \beta_j^2 \leq t$$

El método se basa en el hecho de que cuando hay muchas variables correlacionadas en un modelo de regresión lineal, la estimación de los coeficientes es ineficiente y presenta una alta varianza. El coeficiente altamente positivo de una de las variables explicativas se puede cancelar con el coeficiente altamente negativo de otra de las variables, las cuales están correlacionadas.

El método de encogimiento *Lasso*, es similar al de Arista de regresión. La solución de β_0 , es \bar{y} . Luego, se ajusta un modelo sin el intercepto que simultáneamente minimice la suma de cuadrados de los residuales y haga que la suma de sus valores absolutos sea menor que un parámetro de penalización (t). El método se puede representar como:

$$\hat{\beta}^{\text{lasso}} = \underset{\beta}{\text{Argmin}} \left\{ \sum_{i=1}^N (y_i - \beta_0 - \sum_{j=1}^p X_{ij} + \beta_j)^2 \right\}$$

sujeto a que,

$$\sum_{j=1}^p |\beta_j| \leq t$$

El método de encogimiento *mínimo ángulo de regresión*, inicia de manera similar al de avance por pasos hacia adelante, estimando el intercepto e igualando los coeficientes de las demás variables a cero. En el primer paso, encuentra la variable explicativa (x_j) más correlacionada con los residuales y se construye un modelo lineal simple. Se mueve el coeficiente entre 0 y el coeficiente (β_j) obtenido, hasta que alguna otra variable respuesta (x_k) presente la mayor correlación con los respectivos residuales y se construye un modelo lineal entre los residuales y las dos variables

encontradas. En el siguiente paso se mueven los coeficientes desde cero hasta los respectivos β_j y β_k encontrados, hasta que alguna otra variable (x_l), presente la mayor correlación con los respectivos residuales. El proceso continua hasta que todas las variables explicativas hayan entrado.

Dos métodos basados en combinaciones lineales de las variables explicativas: Componentes Principales de Regresión (PCR) y Mínimos Cuadrados Parciales (PLSR) (Hastie et al. 2008).

Los métodos de este grupo generan número pequeño de combinaciones lineales (Z_m), el cual es menor que el número de variables explicativas original. Las combinaciones lineales son usadas como variables en la regresión en lugar de las originales. Los métodos difieren en la forma como se construyen las combinaciones lineales, en el método *Componentes Principales de Regresión* estas se construyen solo con las variables explicativas, mientras que en el método *Mínimos Cuadrados Parciales* se incluye la variable respuesta.

El mejor método se seleccionó mediante la menor magnitud en la raíz cuadrada media de los errores de predicción (RMSPD) del peso de los racimos de banano, obtenidos por el procedimiento de validación cruzada dejando una observación por fuera (leave-one-out) y mediante el número promedio de variables explicativas (NV) implicadas en el modelo de regresión final (Hastie et al. 2008, Miller 2002). El método elegido se usó para seleccionar las variables explicativas del suelo con mayor nivel de predicción del peso de los racimos.

En la cuarta etapa, se realizó el análisis espacial de cada una de las variables explicativas seleccionadas. El método de mínimos cuadrados ponderados se utilizó para estimar los parámetros del variograma teórico con mejor ajuste al variograma experimental (Diggle y Ribeiro 2007).

En la quinta etapa, para cada propiedad física y química del suelo seleccionada por su relación con el peso de los racimos de banano, se construyó, por interpolación, un mapa de requerimientos, teniendo en cuenta para su elaboración los variogramas ajustado y experimental y el punto crítico de decisión por encima del cual se encuentra el rango óptimo. En el caso de las propiedades químicas se empleó el límite inferior del rango óptimo propuesto por el Ministerio de Agricultura y Ganadería de Costa Rica, como el nivel crítico de decisión (Bertsch 1986). En el caso de los nutrientes: calcio, magnesio, potasio y fósforo, para su análisis se tuvieron en cuenta los niveles propuestos por Espinosa y Mite (2002), para plátano, puesto que en la propuesta de Bertsch (1986) se usaron soluciones extractoras diferentes para estos nutrientes a las usadas en este trabajo (Tabla 3.2). En las propiedades físicas no se usó ningún valor como punto crítico de decisión, dado que éstos aún no se han establecido para el cultivo de banano.

Los análisis estadísticos se realizaron en el lenguaje y ambiente para cálculos estadísticos R (R Development Core Team, 2009). Se utilizaron paquetes adicionales instalados sobre el ambiente R, según la etapa de análisis, así: En la etapa uno, se utilizó el paquete DTK (Matthew 2009); la etapa dos se ejecutó con el paquete

Monomvn (Gramacy 2009) y las etapas tres y cuatro con el paquete geoR (Ribeiro y Diggle 2001).

Tabla 3.2. Guía para la interpretación del análisis de suelos en el cultivo de banano y plátano.

Nutriente	Unidad	Banano (Bertsch 1986)			Plátano (Espinoso y Mite 2002)		
		Bajo	Óptimo	Alto	Bajo	Óptimo	Alto
Aluminio	cmol (+) kg ⁻¹⁽¹⁾		<0.30 ⁽²⁾	1.2	- ⁽³⁾	-	-
Calcio	cmol (+)kg ⁻¹	3.2 ⁽²⁾	3.2 - 16	16	3 ⁽⁴⁾	3 - 6	6
Magnesio	cmol (+)kg ⁻¹	0.8 ⁽²⁾	0.8 - 8	8	1 ⁽⁴⁾	1 - 3	3
Potasio	cmol (+)kg ⁻¹	0.16 ⁽⁵⁾	0.2 - 1	1.2	0.2 ⁽⁴⁾	0.2 - 0.3	0.3
Fósforo	mg kg ^{-1 (1)}	8 ⁽⁵⁾	8 - 32	32	8 ⁽⁶⁾	9 - 15	15
Manganeso	Mg kg ⁻¹	4 ⁽⁵⁾	4 - 4	4	-	-	-
Zinc	mg kg ⁻¹	2.4 ⁽⁵⁾	2.4 - 12	12	-	-	-
Cobre	mg kg ⁻¹	0.8 ⁽⁵⁾	0.8 - 16	16	-	-	-
Hierro	mg kg ⁻¹	8 ⁽⁵⁾	8 - 40	40	-	-	-
pH		5 ⁽⁷⁾	5.5 - 7	7	-	-	-

⁽¹⁾Las unidades se expresan originalmente en cmol(+) L⁻¹ y en mg L⁻¹, se usó la densidad aparente promedio del área trabajada (1,25 g cm⁻³) para ajustar los niveles de nutrientes a cmol (+) kg⁻¹ y a mg kg⁻¹. ⁽²⁾Extraídos con KCl 1N. ⁽³⁾No determinado. ⁽⁴⁾ Bases extraídas con acetato de amonio 1M y neutro. ⁽⁵⁾Olsen Modificado. ⁽⁶⁾Bray II. ⁽⁷⁾Determinado en agua, en relación 1:2.5.

3.3. Resultados y discusión

3.3.1. Análisis descriptivo

Producción. Los gráficos de burbujas muestran la ubicación espacial, en el campo experimental, del peso de los racimos, delimitados por los lotes y por las unidades de suelo (Figuras 3.2 A y B). Nótese que sobre la diagonal sur-norte del campo tienden a concentrarse las plantas que produjeron racimos con mayor peso y

hacia los vértices laterales los de menor peso sugiriendo la presencia de tendencia espacial. El valor $p > 0.05$ para la relación de varianzas de los pesos de los racimos entre los lotes, indica que es homogénea.

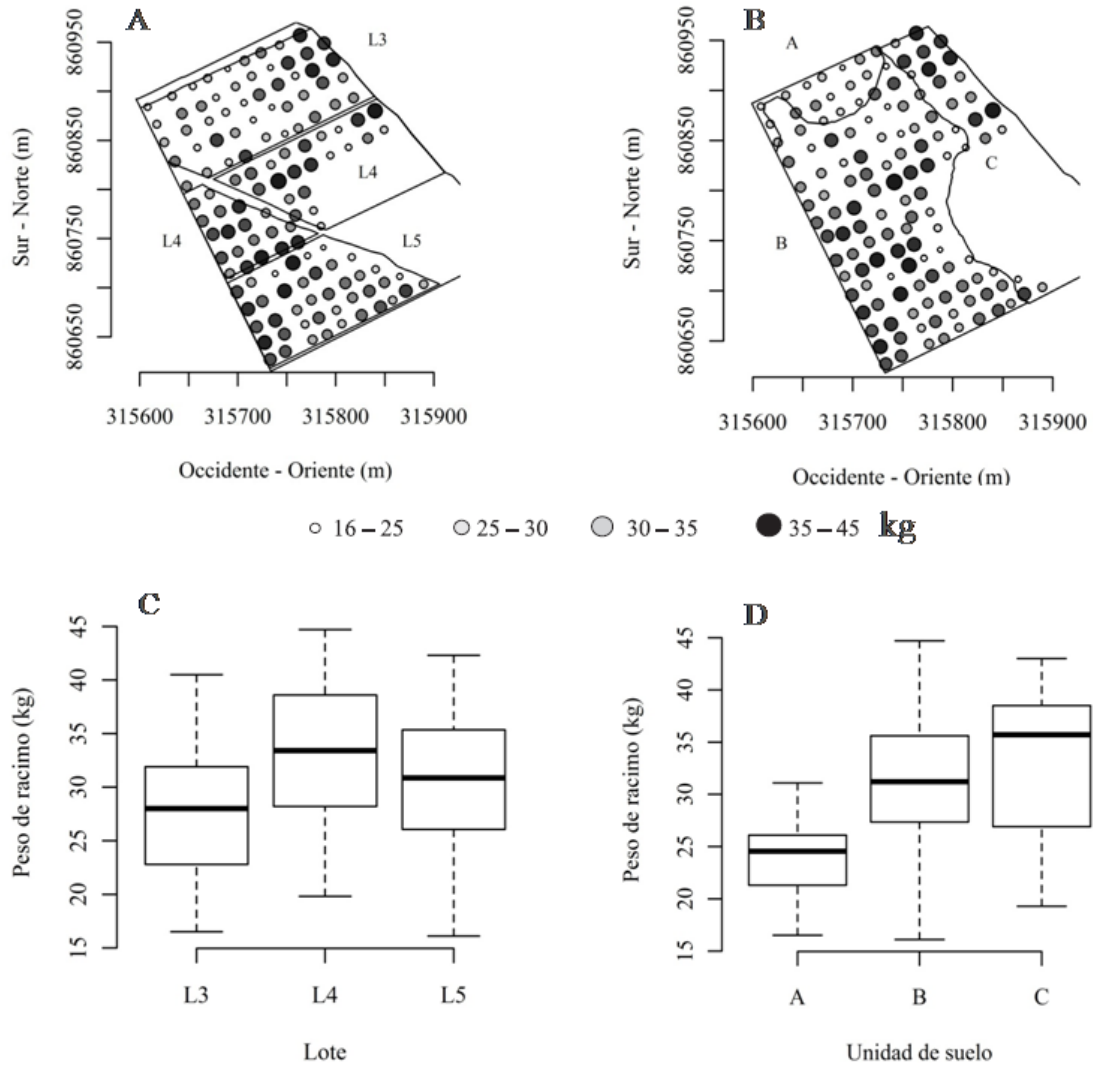


Figura 3.2. Distribución espacial y diagrama de cajas y bigotes del peso (kg) de los racimos en: A y C delimitado por lotes; B y D delimitado por unidades de suelo. Las líneas punteadas delinear los canales de drenaje y los lotes o unidades de suelo.

Con respecto al tipo de suelo, la varianza muestral de la unidad de suelos A es diferente de la de las unidades B y C ($p = 0.029$ y 0.0018 respectivamente), pero no lo es entre ellas ($p > 0.05$). Estos resultados sugieren que, dependiendo de la manera como se agrupen los pesos de los racimos dentro del área de estudio, el nivel de variabilidad entre ciertos grupos es diferente.

Con respecto al peso promedio de los racimos, el lote L4 presentó el mayor promedio (32.71 kg) aunque no fue significativamente diferente de los lotes L3 (28.13 kg) y L 5 (30.85 kg). Aunque en este caso no fue significativa, es común la existencia de sectores dentro de la finca con diferentes productividades, similar a lo reportado por Serrano *et al.* (2006), y que además pueden ser identificados y delimitados a través de características en campo asociadas al manejo como son los lotes.

Respecto a los tipos de suelos, la unidad A (24.26 kg) fue significativamente diferente de las unidades B (30.96 kg) y C (32.82 kg) ($p = 0.0004$ y $p = 0.0003$, respectivamente) y no se presentó diferencia entre las unidades B y C ($p = 0.470$) (Figuras 3.2 C y D).

Propiedades del suelo. En la Tabla 3.3 se presentan los principales estadísticos descriptivos de las propiedades físicas y químicas del suelo y se define si hay o no diferencia estadísticamente significativa entre los promedios de ellas, por lote.

Propiedades químicas. Toda el área presentó una reacción ligeramente ácida, sin diferencia significativa entre lotes. Los niveles promedios de acidez intercambiable no representan un problema para este cultivo, según Bertsch (1986).

Son altos los niveles de hierro disponible ($L3 = 139.9 \text{ mg kg}^{-1}$, $L4 = 163.5 \text{ mg kg}^{-1}$, $L5 = 149 \text{ mg kg}^{-1}$). En campo se observó toxicidad por hierro en plantas pequeñas (en la hoja tres, con ancho entre 10 y 15 cm), característica que desapareció durante el crecimiento de éstas. El manganeso se encontró en niveles adecuados.

El contenido promedio de fósforo estuvo en el rango óptimo, de acuerdo con Bertsch (1986), aunque según López y Espinosa (1995), dichos contenidos fueron bajos; además, el contenido en el lote 3 (9.44 mg kg^{-1}) fue diferente significativamente al del Lote 4 (10.93 mg kg^{-1}) y al del Lote 5 (12.55 mg kg^{-1}). La concentración promedio de calcio se encuentra en un nivel alto en el Lote 3 y es diferente, a pesar del manejo agronómico uniforme, a la de los Lotes 4 y 5, en los cuales el contenido está en el rango óptimo.

El contenido promedio de magnesio se encuentra en el rango óptimo y se puede considerar uniforme en los tres lotes. La relación calcio magnesio (Ca/Mg: $L3 = 3.0$, $L4 = 2.7$ y $L5 = 2.9$) se encuentra por debajo del rango adecuado sugerido para banano por López (1983), que debe estar entre 3.5 y 4.0. Todos los lotes presentan un contenido similar y óptimo de potasio y la relación calcio potasio (Ca/K: $L3 = 45.0$; $L4 = 37.9$ y $L5 = 40.7$) se encuentra muy por encima del rango adecuado (Ca/K: 17.0 – 25) sugerido por López (1983), lo que podría generar antagonismo entre estos nutrientes, si se desbalancea la relación Mg/K. La relación magnesio potasio (Mg/K: $L3 = 15.25$; $L4 = 14.1$ y $L5 = 14.2$), según López (1983), se encuentra en el rango óptimo (Mg/K: 8.0 - 15), aunque otros autores reportan los valores de 3.3 y de 3.6 como indicadores de una relación Mg/K balanceada (López y Espinosa 1995).

El zinc y el boro disponibles se encuentran en niveles bajos en el suelo (Bertsch 1986, Vargas *et al.* 2007) y los demás nutrientes se encuentran en niveles adecuados. En cuanto al contenido de materia orgánica, el Lote 3 presentó el más bajo nivel (1.5 %), el cual fue significativamente diferente de los Lotes 4 (2.44 %) y 5 (2.18 %): en los tres lotes ésta fue deficiente. Las características químicas con mayor variabilidad en todos los lotes (coeficiente de variación > 50 %) fueron: aluminio, azufre y manganeso. El boro presentó alta variabilidad en el Lote 3.

Propiedades físicas. La textura del suelo, en los lotes trabajados, se ubicó entre arcillo limosa y franco arcillo limosa, sin diferencias en la composición textural promedia entre lotes. Se presentó un mayor nivel de dispersión de arcillas en el Lote 3, respecto a los demás. La compactación del suelo a las diferentes distancias de la planta y en todos los lotes muestreados se ubicó en el rango de 2.05 a 2.5 kg cm⁻² y se puede considerar homogénea.

El Lote 3 presentó la menor densidad aparente (1.23 Mg m⁻³), similar a la del Lote 4 (1.24 Mg m⁻³) y diferente de la encontrada en el Lote 5 (1.29 Mg m⁻³). Vaquero (2003) sostiene que cuando el suelo está a capacidad de campo, un valor de resistencia a la penetración entre 2.0 – 3.0 kg cm⁻² está asociado con un suelo de consistencia firme e indica alta compactación y que valores de resistencia a la compactación, mayores a 2.5 kg cm⁻², con una densidad aparente mayor a 1.2 Mg m⁻³, reducen drásticamente la densidad de raíces. En cuanto a los índices de estructuración del suelo, éstos presentan diferencias significativas entre lotes, aunque se observa un efecto de la condición de humedad en que se haga el cribado: en seco o en húmedo.

Tabla 3.3. Principales estadísticos descriptivos de las propiedades del suelo y comparaciones pareadas de los promedios, en los lotes 3, 4 y 5 del campo experimental de Augura, Carepa, Colombia

Variable	Unidad	Lote: L3				Lote: L4				Lote: L5			
		Prom ⁽¹⁾	SD ⁽²⁾	CV ⁽³⁾	DTK ⁽⁴⁾ p<0.05	Prom	SD	CV	DTK p<0.05	Prom	SD	CV	DTK p<0.05
pH		5.15	0.36	0.07	a ⁽⁵⁾	5.10	0.36	0.07	a	5.13	0.34	0.07	a
MO ⁽⁶⁾	%	1.51	0.66	0.44	b	2.44	0.82	0.34	a	2.18	0.94	0.43	b
Aluminio		1.09	0.72	0.66	a	1.12	0.89	0.79	a	0.96	0.73	0.76	a
Calcio		16.49	2.88	0.17	a	14.01	3.33	0.24	b	15.50	4.25	0.27	ab
Magnesio	cmol(+)/kg-	5.49	0.86	0.16	a	5.22	0.65	0.13	a	5.40	0.73	0.13	a
Potasio	l	0.36	0.10	0.29	a	0.37	0.10	0.28	a	0.38	0.14	0.37	a
CICE ⁽⁷⁾		23.54	2.77	0.12	a	20.60	3.11	0.15	b	22.36	4.11	0.18	ab
CIC7 ⁽⁸⁾		22.22	2.98	0.13	a	21.25	3.26	0.15	a	21.75	3.24	0.15	a
Fósforo		9.44	2.78	0.29	b	10.93	3.67	0.34	ab	12.55	4.88	0.39	a
Azufre		13.48	7.09	0.53	a	12.67	7.43	0.59	a	16.57	11.34	0.68	a
Hierro		139.9	46.62	0.33	a	163.48	42.06	0.26	a	149.00	39.35	0.26	a
Manganeso	mg kg-1	22.48	11.39	0.51	a	21.19	11.31	0.53	a	20.60	10.52	0.51	a
Cobre		5.67	1.37	0.24	b	6.90	1.48	0.21	a	7.20	1.71	0.24	a
Zinc		1.88	0.61	0.32	a	2.07	0.71	0.34	a	2.08	0.80	0.38	a
Boro		0.26	0.14	0.53	ab	0.29	0.13	0.45	a	0.21	0.08	0.40	b
Arena		15.04	3.48	0.23	a	15.52	4.00	0.26	a	14.90	3.92	0.26	a
Limo		44.83	3.37	0.08	a	45.29	3.53	0.08	a	44.73	3.10	0.07	a
Arcilla		39.54	4.21	0.11	a	39.19	3.59	0.09	a	39.73	5.72	0.14	a
ArD ⁽⁹⁾	%	5.17	1.78	0.34	a	3.77	1.90	0.50	b	4.01	2.18	0.54	b
H0.3 ⁽¹⁰⁾		36.41	3.64	0.10	a	35.38	3.40	0.10	a	36.58	4.19	0.11	a
H15 ⁽¹¹⁾		23.65	2.84	0.12	a	22.59	2.67	0.12	a	23.35	3.22	0.14	a
Da ⁽¹²⁾	g cm-3	1.23	0.10	0.08	b	1.24	0.11	0.08	ab	1.29	0.09	0.07	a
CD ⁽¹³⁾	%	12.72	3.54	0.28	a	9.30	3.77	0.41	b	9.96	5.31	0.53	b
CP30 ⁽¹⁴⁾		2.10	0.82	0.39	a	2.27	0.82	0.36	a	2.51	0.77	0.31	a
CP60 ⁽¹⁵⁾	kg cm-2	2.07	0.70	0.34	a	2.23	0.78	0.35	a	2.46	0.86	0.35	a
CP100 ⁽¹⁶⁾		2.05	0.78	0.38	a	2.07	0.67	0.32	a	2.24	0.88	0.39	a
DPMS ⁽¹⁷⁾	mm	4.70	0.26	0.05	a	3.97	0.59	0.15	b	4.66	0.36	0.08	ab
AFS ⁽¹⁸⁾		2.03	1.64	0.81	b	3.72	2.37	0.64	a	3.51	2.57	0.73	a
AES ⁽¹⁹⁾	%	83.10	4.55	0.05	a	82.70	5.15	0.06	a	79.40	5.55	0.07	b
IES ⁽²⁰⁾		20.70	6.75	0.33	b	20.60	6.34	0.31	b	26.56	9.08	0.34	a
DPMH ⁽²¹⁾	mm	1.99	0.79	0.40	b	2.47	0.68	0.27	a	1.71	0.82	0.48	b
AFH ⁽²²⁾		44.94	16.37	0.36	a	35.88	12.49	0.35	b	52.64	21.06	0.40	a
AEH ⁽²³⁾		79.50	3.73	0.05	ab	78.42	4.63	0.06	b	81.74	6.05	0.07	a
IEH ⁽²⁴⁾	%	26.05	5.84	0.22	ab	27.97	7.92	0.28	a	22.98	8.93	0.39	b
RF ⁽²⁵⁾		58.55	21.64	0.37	b	51.45	24.89	0.48	b	72.01	16.92	0.23	a

⁽¹⁾Promedio. ⁽²⁾Desviación estándar. ⁽³⁾Coeficiente de variación. ⁽⁴⁾Comparación pareada múltiple de Dunnett-Tukey-Kramer, para tamaños de muestras diferentes (Matthew 2009). ⁽⁵⁾Diferencias significativas ($p < 0.05$) para promedios con letras diferentes por filas. ⁽⁶⁾Materia orgánica. ⁽⁷⁾Capacidad de intercambio catiónico efectiva. ⁽⁸⁾Capacidad de intercambio catiónico a pH 7. ⁽⁹⁾Arcilla dispersa. ⁽¹⁰⁾Retención de humedad a 0.3 atm. ⁽¹¹⁾Retención de humedad a 15 atm. ⁽¹²⁾Densidad aparente del suelo. ⁽¹³⁾Coeficiente de dispersión. ⁽¹⁴⁾Compactación del suelo a 30 cm de la planta. ⁽¹⁵⁾Compactación del suelo a 60 cm de la planta. ⁽¹⁶⁾Compactación del suelo a 100 cm de la planta. ⁽¹⁷⁾Diámetro ponderado medio de agregados en seco. ⁽¹⁸⁾Agregados finos del suelo en seco. ⁽¹⁹⁾Agregados extremos del suelo en seco. ⁽²⁰⁾Índice de estructuración del suelo en seco. ⁽²¹⁾Diámetro ponderado medio de agregados en húmedo. ⁽²²⁾Agregados finos en húmedo. ⁽²³⁾Agregados extremos en húmedo. ⁽²⁴⁾Índice de estructuración del suelo en húmedo. ⁽²⁵⁾Raíz funcional de la planta.

Así por ejemplo, el diámetro ponderado medio de agregados cribados en seco osciló entre 3.97 y 4.70 mm en los lotes, con un contenido de agregados finos (< 0.5mm) entre el 2.03 y el 3.72. Cuando el cribado se hizo en húmedo, el diámetro ponderado medio osciló entre 1.99 y 2.47 mm, con una cantidad de agregados finos variando en los lotes entre 35.88 y 52.64 %, lo que indica poca resistencia de los agregados al humedecimiento, a pesar de tener contenidos relativamente altos de arcilla (39.19 – 39.73 %) que deberían estimular una buena agregación.

Lo anterior puede deberse a que los suelos trabajados son poco evolucionados (Entisoles e Inceptisoles) y/o a que han tenido una fuerte intervención antrópica (Martínez-Trinidad *et al.* 2008, Barroso 1991). Las propiedades físicas presentaron una menor variabilidad, con respecto a las químicas, siendo los agregados finos determinados en seco, la característica más variable.

3.3.2. Evaluación de la tendencia espacial en función de los ejes coordenados

El análisis de tendencia espacial para el peso del racimo en función de los ejes coordenados produce la siguiente superficie de tendencia lineal:

$$PR = 48.04 - 0.01 d_1 - 0.01d_2 + 0.001d_1d_2 \quad R^2 \text{ ajustado} = 0.169 \text{ y valor } p = 0.00766$$

Donde d_1 y d_2 son los ejes coordenados en las direcciones oriente-occidente y norte-sur respectivamente.

La superficie anterior explica el 16.9 % del comportamiento del peso de los racimos dentro del campo (Tabla 3.4) (Figura 3.3A), por lo que es un modelo inadecuado para este propósito, lo que se corroboró con la propuesta de Diggle y Ribeiro (2007) de comparar los variogramas de los residuales, una vez extraída la tendencia, con variogramas empíricos envolventes calculados a partir de permutaciones aleatorias de los residuales.

3.3.3. Evaluación de la tendencia espacial en función de las propiedades del suelo

Para todo el campo experimental, de todas las variables edáficas evaluadas, sin usar variables indicadoras, sólo se correlacionaron significativamente con el peso del racimo, los contenidos de Arena, de Ca y de Mg, el pH, la H15, el DPMS y el DPMH. El modelo que los relacionó tuvo un valor $p < 0.0001$ y un R^2 ajustado del 28.3 %. Aunque con este modelo se mejora la estacionaridad del peso de los racimos en el campo de estudio, su capacidad predictiva sigue siendo baja, haciéndolo un modelo poco prometedor, en términos de explicar su comportamiento (Tabla 3.4) (Figura 3.3B).

3.3.4. Modelo lineal general completo, en función de las propiedades del suelo usando variables indicadoras

La función media del peso de los racimos para toda el área estudiada se descompuso, adecuadamente, a través de un modelo lineal aditivo según el siguiente modelo estadístico:

$$\hat{Y}_{ijm} = \beta_{0i} + \beta_{0j} + \sum_{k=1}^p \beta_{ik} x_{imk} + \sum_{k=1}^p \beta_{jk} x_{ijk} + e_{ij}$$

Donde, Y_{ijm} es el peso de racimo en el tipo de suelo i del lote j de la planta m , β_{0i} , es el intercepto para el tipo de suelo i , β_{0j} es el intercepto para el lote j , β_{ik} es el coeficiente de regresión de la propiedad del suelo k en el tipo de suelo i , x_{imk} es el valor tomado por la propiedad del suelo k en la planta m en el tipo de suelo i , β_{jk} es el coeficiente de regresión de la propiedad del suelo k en el lote j , x_{jmk} es el valor tomado por la propiedad del suelo k en la planta m en el lote j y e_{ij} el error experimental.

El modelo general construido de manera integral, incluyendo simultáneamente el tipo de suelo, los lotes y las propiedades del suelo significativas dentro de cada uno de ellos (Tabla 3), explicó la variabilidad del peso de los racimos de banano en un 98.43 %, con un valor $p < 0.05$ (Figura 3.3C), presentando un ajuste superior al uso de los ejes coordenados, y al no uso de variables indicadoras.

Tabla 3.4. Modelos de regresión explicativos del peso de los racimos construidos a partir de: los ejes coordenados, las propiedades del suelo sin variables indicadoras y de las propiedades del suelo usando el tipo de suelo y los lotes como variables indicadoras.

Variable indicadora		Coeficientes de las variables significativamente relacionadas (p<0.001) con el peso del racimo													R ² Ajustado									
Coordenadas	$\beta_0^{(1)}$	$x^{(2)}$	$y^{(3)}$	$x:y$										0.16										
	48	-0.1	-0.1	0.001																				
Sin variable indicadora	β_0	A ⁽⁴⁾	pH ⁽⁵⁾	Ca ⁽⁶⁾	Mg ⁽⁷⁾	H15 ⁽⁸⁾	DPMS ⁽⁹⁾	DPMH ⁽¹⁰⁾							0.28									
	84.8	-0.47	-6.2	-0.38	1.68	0.56	-6.02	-2.42																
Tipo de suelo	A	β_0	A	pH	MO ⁽¹¹⁾	CIC7 ⁽¹²⁾	Fe ⁽¹³⁾	Cu ⁽¹⁴⁾	B ⁽¹⁵⁾	H15	c30 ⁽¹⁶⁾	c60 ⁽¹⁷⁾	DPMS	DPMH					0.98					
		-6287.0	31.7	115.3	-69.2	-35.1	2.2	15.3	-513.4	10.4	-40.3	91.6	111.8	-51.4										
		B	β_0	A	pH	Cu	B	H15	c30	c60	DPMH													
-4742.0	4.6		-13.3	-2.0	43.9	-8.3	-17.2	-29.8	-58.1															
C	β_0	pH	MO	Fe	Cu	H15	c30	DPMH																
	-2222.0	-508.8	116.2	-3.2	-4.8	9.4	-58.5	-150.0																
L3	β_0	L ⁽¹⁸⁾	Al ⁽¹⁹⁾	Ca	Mn ⁽²⁰⁾	H0.3 ⁽²¹⁾	Da ⁽²²⁾	CD ⁽²³⁾	AFS ⁽²⁴⁾	AFH ⁽²⁵⁾	AEH ⁽²⁶⁾	IEH ⁽²⁷⁾	RF ⁽²⁸⁾					0.98						
	0.00	8.6	3.5	14.7	-2.8	4.3	-179.5	2.6	5.7	-5.5	51.7	31.0	-1.0											
L4A	β_0	L	Al	Ca	CICE ⁽²⁹⁾	P ⁽³⁰⁾	S ⁽³¹⁾	Fe	Mn	Zn ⁽³²⁾	H0.3	H15	Da	CD	c30	c60	AFS	AES ⁽³³⁾	AEH	IEH	RF			0.98
	-21440.0	56.9	235.4	494.7	-389.7	-185.2	14.7	28.8	-87.0	745.3	5.9	-470.1	-3035.0	45.2	779.0	-656.8	-311.9	-59.7	414.1	281.0	15.2			
L4B	β_0	A	L	Al	Ca	CICE	P	Fe	Mn	Zn	Da	CD	c30	c60	AFS	AES	AEH	IEH					0.98	
	35040.0	-54.9	-77.2	-36.7	123.5	-97.7	11.4	-2.2	-27.4	287.3	-1068.0	7.2	-105.0	110.1	0.6	18.9	-263.7	-157.3						
L5	β_0	A	Al	Fe	Mn	H15	c30	c60	AFS	AFH							0.98							
	4626.0	-4.2	-8.6	-0.6	0.3	8.4	17.6	31.7	-1.1	-2.7														

⁽¹⁾Intercepto. ⁽²⁾Coordenada oriente-occidente. ⁽³⁾Coordenada norte-sur. ⁽⁴⁾Arena. ⁽⁵⁾pH. ⁽⁶⁾Calcio intercambiable. ⁽⁷⁾Magnesio intercambiable. ⁽⁸⁾Humedad gravimétrica retenida a 15 atm. ⁽⁹⁾Diámetro ponderado medio determinado en seco. ⁽¹⁰⁾Diámetro ponderado medio determinado en húmedo. ⁽¹¹⁾Materia orgánica. ⁽¹²⁾Capacidad de intercambio catiónico a pH7. ⁽¹³⁾Hierro disponible. ⁽¹⁴⁾Cobre disponible. ⁽¹⁵⁾Boro disponible. ⁽¹⁶⁾Compactación superficial a 30 cm de la planta. ⁽¹⁷⁾Compactación superficial a 60 cm de la planta. ⁽¹⁸⁾Limo. ⁽¹⁹⁾Aluminio intercambiable. ⁽²⁰⁾Manganeso disponible. ⁽²¹⁾Humedad gravimétrica a 0.3 atm. ⁽²²⁾Densidad aparente del suelo. ⁽²³⁾Coeficiente de dispersión. ⁽²⁴⁾Agregados finos determinados en seco. ⁽²⁵⁾Agregados finos determinados en húmedo. ⁽²⁶⁾Agregados extremos determinados en húmedo. ⁽²⁷⁾Índice de estructuración determinado en húmedo. ⁽²⁸⁾Raíz funcional. ⁽²⁹⁾Capacidad de intercambio catiónico efectiva. ⁽³⁰⁾Fósforo disponible. ⁽³¹⁾Azufre disponible. ⁽³²⁾Zinc disponible. ⁽³³⁾Agregados extremos determinados en seco.

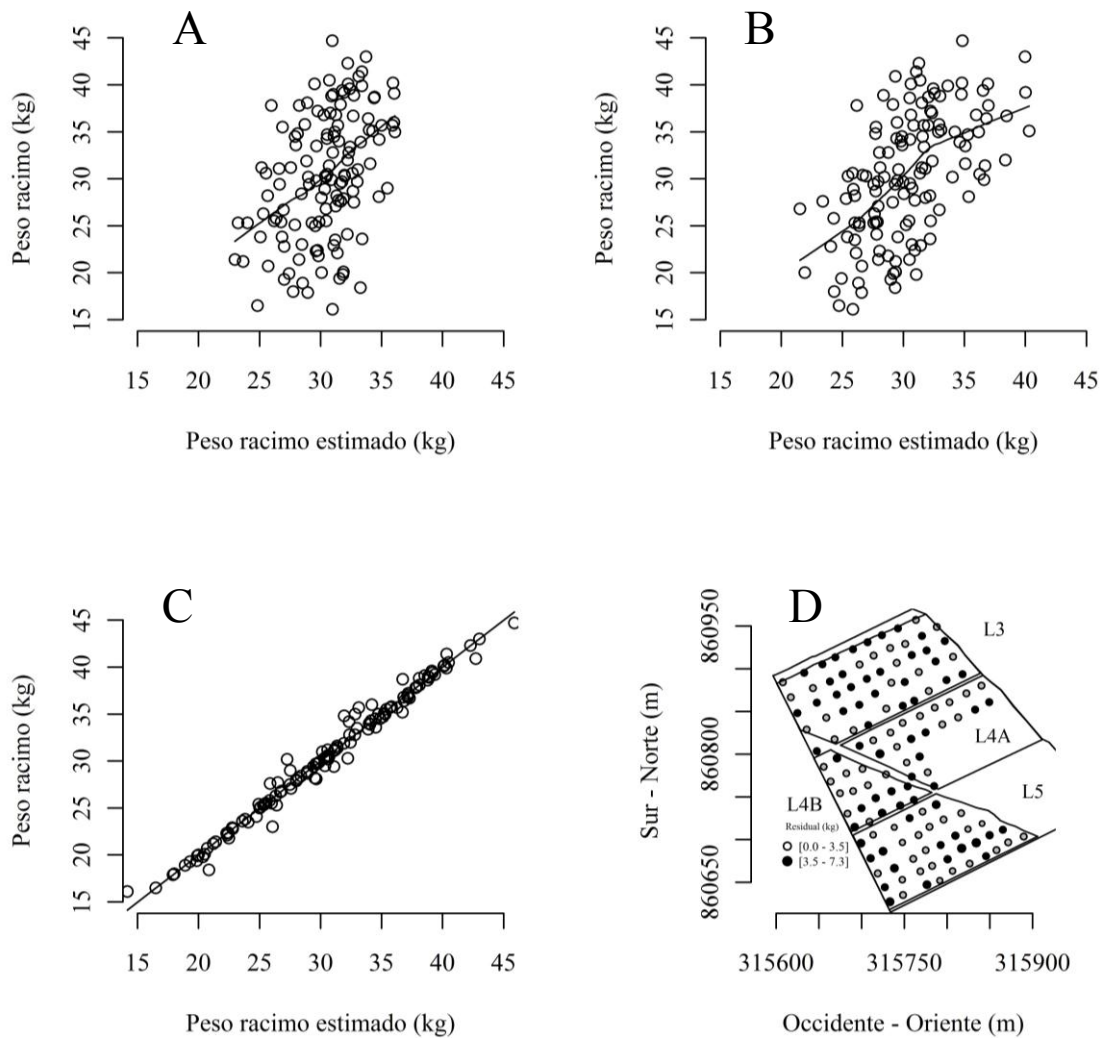


Figura 3.3. Ajuste entre el peso de los racimos de banano y estimaciones del peso de de estos con modelos de regresión construidos a partir de: A. Los ejes coordenados, B. Las propiedades del suelo sin variables indicadoras y C. Las propiedades del suelo utilizando el tipo de suelo y los lotes como variables indicadoras. D. Distribución de los residuales del modelo C en el campo experimental

La variabilidad del peso de los racimos explicada con el modelo general, según la metodología de Diggle y Ribeiro (2007), se conoce como tendencia y como lo enfatizan los mencionados autores, el modelo encontrado explica las causas de la variabilidad de producción, más que simplemente extraer la tendencia. La variabilidad restante no explicada que queda en los residuales, y que es obtenida por la diferencia entre los valores reales de peso de los racimos y los pesos estimados a través del modelo general, muestra una distribución sin tendencias (Figura 3.3D), es decir que no se observa distribución preferencial en el valor del pesos de los racimos en el campo experimental. Sobre la variabilidad restante se evalúa la dependencia espacial, la cual es adecuadamente estimada a través del variograma experimental.

No obstante el comportamiento mencionado, hay dos aspectos relevantes: el primero tiene que ver con la diferencia en las covariables que se relacionaron con el peso de los racimos tanto en cada uno de los tipos de suelo como de los lotes. El segundo aspecto, es la mejor capacidad que presentan los lotes sobre el tipo de suelo para extraer la tendencia, lo que estaría indicando que las unidades de suelos delimitadas en este campo no discriminan adecuadamente la tendencia espacial en la producción de banano, probablemente debido a que la escala (1:500) a la cual se realizaron estos trabajos en el campo experimental, sobrepasaron las distancias a las cuales se presentaba la tendencia espacial en la producción.

De manera similar, Brejda *et al.* (2000), buscando estimar la probabilidad de distribución de las propiedades del suelo, encontraron que, aún agrupando las muestras por series de suelos, las estimaciones tenían una baja probabilidad, inducida

por una alta variabilidad en la serie. Este mejor ajuste probablemente se debe a que el manejo agronómico de las fincas bananeras se hace homogéneamente en los lotes, y como lo sugieren Paz-González et al. (2000), parte de la variabilidad de los suelos está asociada a condiciones inducidas por el uso y manejo de los mismos.

3.3.5. Variogramas experimentales de la producción

El variograma experimental corrobora que el modelo general extrae y explica más del 90 % de la variabilidad espacial total del peso de los racimos de banano, respecto al no uso de éste, soportado en la mayor meseta presentada en los variogramas experimentales de la producción, respecto a la presentada en la de los residuales (Tabla 3.5).

La producción, presentó un efecto anisotrópico, es decir, que la dependencia espacial tuvo variación diferencial de acuerdo con la dirección, como se observa en la diferente proporción y rango presentado por los variogramas en las direcciones evaluadas, tanto con el peso de los racimos, como de los residuales. La mayor dependencia de la producción se presentó en la dirección de 180° que, según Cambardella et al (1994), fue fuerte (Tabla 3.5).

La dependencia espacial evaluada omnidireccionalmente, así como en la dirección de 60°, desaparece en los residuales, respecto a la dependencia existente en el peso de los racimos. En los demás casos, la dependencia espacial en los residuales, y según criterios de Cambardella *et al.* (1994), es débil en la dirección de 30° y moderada en las direcciones de 90° y 180°.

Tabla 3.5. Parámetros de los modelos ajustados a los semivariogramas empíricos isotrópico y anisotrópicos con y sin tendencia del peso de los racimos de banano.

Variable	Ángulo	Modelo	Pepita (τ^2)	Meseta (σ^2)	$\phi^{(1)}$	Kappa ⁽²⁾	Proporción ⁽³⁾ (τ^2/σ^2)	Rango
Peso del racimo	Isotrópico	Matern	20.00	32.13	35.90	0.50	0.62	107.56
	30°	Matern	25.00	50.81	68.97	2.00	0.49	275.79
	60°	Matern	20.00	39.41	36.65	1.00	0.51	146.56
	90°	Matern	25.00	27.71	18.54	2.00	0.90	99.51
	180°	Exponencial	10	46.27	30.7	0.5	21.61	275.55
Residuales	Isotrópico	Pepita puro	-(6)	6.60	-	-	-	-
	30°	Matern	2.50	2.60	13.81	1.00	0.96	55.21
	60°	Pepita puro	-	6.23	-	-	-	-
	90°	Matern	2.31	5.83	22.31	1.00	0.40	89.22
	180°	Exponencial	3.5	4.95	54.05	1.00	71.4	161.94

⁽¹⁾Tasa a la cual la correlación decae a cero cuando se aumenta la distancia entre dos puntos. ⁽²⁾Parámetro de forma de la función de correlación ⁽³⁾Relación entre el efecto pepita y la semivarianza total. Valores <0.25 indican una fuerte dependencia espacial, entre, 0.25 y 0.75 indican una moderada dependencia espacial y >0.75 indican una leve dependencia espacial (Cambardella *et al.*, 1994). ⁽⁴⁾Ángulo de rotación de los ejes. ⁽⁵⁾Relación de anisotropía. ⁽⁶⁾No aplica para el modelo pepita puro.

Se considera que la descomposición de la variabilidad espacial efectuada y representada en el semivariograma experimental encontrado es, técnica y científicamente relevante, puesto que, la función media de la producción del área estudiada es explicada en función de las propiedades del suelo que tienen significado agronómico y sobre las cuales debe centrarse la estrategia de manejo por sitio específico.

3.3.6. Métodos de selección de variables relacionadas con producción

La variabilidad de la producción de banano puede ser descompuesta por fuentes, en este caso los lotes y las propiedades del suelo, que fueron significativas dentro de cada lote. Estas propiedades son las que tienen mayor potencial de ser introducidas en un programa de manejo por sitio específico. Sin embargo, la considerable cantidad de propiedades que pueden relacionarse (Tabla 3.4) con la variabilidad de la producción, dificulta el establecimiento de un programa de manejo por sitio específico para cada una de éstas.

El método de descomposición de la variabilidad de la producción sugerido por Diggle y Ribeiro (2007), se fundamenta en un modelo de regresión lineal múltiple y suministra una descripción de cómo las propiedades del suelo, estimadas por mínimos cuadrados, afectan la producción. De acuerdo con Hastie *et al.* (2008), las estimaciones por mínimos cuadrados tienen dos aspectos no satisfactorios. El primero, se debe al bajo sesgo que presentan, característica ideal para un método robusto, pero esta propiedad incrementa la varianza y disminuye la precisión de predicción. El segundo aspecto, es de manejo, y en algunas ocasiones de interpretación: cuando se tiene un gran número de variables, con frecuencia se quiere seleccionar el subconjunto más pequeño que tenga la más alta precisión en la predicción de la variable respuesta.

Para lograr precisión en la predicción con un subconjunto pequeño de variables explicativas, se debe sacrificar un poco de sesgo, lo que se puede lograr reduciendo o igualando a cero los coeficientes de algunas de las variables explicativas. La precisión de una predicción, se puede evaluar a través de la menor magnitud en el RMSPD.

En la Tabla 3.6, se presentan los resultados de la validación cruzada para los ocho métodos usados en la selección de las variables relacionadas de manera lineal con el peso de los racimos de banano, con diferentes tamaños de muestra, así como el número de variables implicadas en el modelo final. Se recuerda que el método de validación cruzada dejando una observación por fuera, usa $n-1$ observaciones para la obtención del modelo y con este se predice la observación no usada; la diferencia entre el valor de la observación y el valor de predicción sirve para estimar la raíz cuadrada media del error de predicción o RMSPD.

El método de ajuste por mínimos cuadrados ordinarios tuvo una baja precisión en la predicción (RMSPD entre 15.85 y 49.74 kg) para tamaños de muestra pequeños ($n \leq 47$). La selección de variables por pasos hacia adelante y hacia atrás, usando el Criterio de Información de Akaike como criterio de selección del modelo, tampoco aumentó la precisión de la predicción (RMSPD entre 16.45 y 47.38 kg), cuando la selección de variables se efectuó con tamaños de muestra pequeños ($n < 48$) e involucró entre 22 y 28 variables explicativas del peso del racimo de banano.

Tabla 3.6. Precisión de predicción y número de propiedades del suelo relacionadas con producción de ocho métodos de selección de variables, agrupadas por lotes según división de la finca para administración y manejo agronómico de estos, con diferentes tamaños de muestra. Variables evaluadas en el campo experimental de la Asociación de Bananeros de Colombia. municipio de Carepa, Colombia.

Lote	n ⁽¹⁾	OLS ⁽²⁾		ESTEP AIC ⁽³⁾		LASSO ⁽⁴⁾			PLSR ⁽⁵⁾		PCR ⁽⁶⁾		LAR ⁽⁷⁾			RIDGE ⁽⁸⁾			FORWARD STAGEWISE ⁽⁹⁾		
		RMSPD ⁽¹⁰⁾	NV ⁽¹¹⁾	RMSPD	NV	RMSPD	NV	λ_m ⁽¹²⁾	RMSPD	NV	RMSPD	NV	RMSPD	NV	λ_m	RMSPD	NV	λ_m	RMSPD	NV	λ_m
L3	48	49.74	35	47.38	22	6.28	3	10.78	6.17	35	6	35	6.28	3	10.8	6.42	35	248.2	6.28	3	10.8
L4	42	15.85	35	16.45	28	6.91	4	12.28	7.04	35	6.62	35	6.9	2	13.5	6.54	35	2.15	6.73	5	12.5
L5	40	36.16	35	32.99	27	6.83	1	12.28	6.53	35	6.57	35	6.94	1	13.5	6.46	35	2.15	6.77	0	12.5
C.Exp. ⁽¹³⁾	130	6.96	35	6.87	11	6.51	6	12.41	6.43	35	6.61	35	6.56	5	13.8	6.34	35	107.3	6.53	5	13.6

⁽¹⁾Tamaño de muestra. ⁽²⁾Ajuste por mínimos cuadrados ordinarios. ⁽³⁾Método de selección de variables basado en el criterio de Akaike. ⁽⁴⁾Método de encogimiento Lasso. ⁽⁵⁾Regresión por mínimos cuadrados parciales. ⁽⁶⁾Regresión por componentes principales. ⁽⁷⁾Mínimo ángulo de regresión. ⁽⁸⁾Regresión ridge. ⁽⁹⁾Avance por etapas en la selección de variables. ⁽¹⁰⁾Raíz cuadrada media de los errores de predicción del peso de los racimos de banano, obtenidos por el procedimiento de validación cruzada, dejando uno por fuera, expresada en kg. ⁽¹¹⁾Número de variables explicativas promedio en el modelo de regresión, después del proceso de selección. ⁽¹²⁾Parámetro de penalización. ⁽¹³⁾Campo experimental

El comportamiento en los dos casos anteriores puede deberse al alto número de variables explicativas usadas (35), valor muy cercano a los tamaños de muestra utilizados en cada lote (39, 41 y 47) y/o a la presencia de colinealidad entre variables explicativas, lo que puede inducir a que el método de selección nunca encuentre el mejor modelo y a que los modelos obtenidos tengan coeficientes de determinación altos (Hastie *et al.* 2008; Chatterjee y Hadi 2006. Miller 2002).

Los autores mencionados también comentan que un tamaño de muestra grande disminuye el error de la predicción por disminución de la varianza, con efecto considerable sobre el coeficiente de determinación. En efecto, el aumento del tamaño de muestra ($n = 129$) incrementó la precisión del método de ajuste por mínimos cuadrados ordinarios (RMSPD = 6.96 kg) y del método de selección de variables por pasos hacia adelante y hacia atrás, basado en el Criterio de Información de Akaike (RMSPD = 6.87 kg), reduciendo, en este último a once, el número de variables explicativas requeridas.

Las estrategias usadas por los métodos de encogimiento (Ridge, Lasso y Lar) y combinaciones lineales (PCR, PLSR) de las variables explicativas, así como el avance por etapas, presentan buena precisión en la predicción, tanto en muestra pequeñas como grandes. Sin embargo, los métodos que usan componentes, como nuevas variables para explicar la producción, tienen involucradas todas las propiedades del suelo en cada uno de ellos, lo que los hace ineficientes para seleccionar propiedades de interés. Aunque, el método Ridge pertenece al grupo de los métodos de encogimiento, la estrategia de penalización sobre los coeficientes no

es eficiente para seleccionarlos. Los métodos Lasso, Lar y Forward Stagewise cumplen con los requisitos inicialmente buscados de: ser parsimoniosos, es decir, requieren un número pequeño de propiedades en el modelo final, y tienen buena precisión en la predicción de la producción, tanto a nivel de lote como de todo el campo experimental.

La precisión de la predicción con el método Lasso, por lotes, osciló entre 6.28 y 6.91 kg, involucrando entre 1 y 4 propiedades de predicción por lote, mientras que para todo el área del experimento, la precisión fue de 6.51 kg, involucrando, en promedio de todas las 129 validaciones cruzadas, seis propiedades. El método Lasso evidencia un efecto de lote, sin embargo, la estrategia no perdió precisión cuando se trabajó a nivel de toda el área de experimentación, con un aumento de dos variables con respecto al lote L4 que fue el que más propiedades involucró, para la predicción del peso de los racimos, lo que no pareciera ser muy determinante.

La selección de variables relacionadas con el peso de racimos de banano se realizó finalmente, con el método Lasso porque, además de ser un método parsimonioso con bajo RMSPD, Hastie *et al.* (2008), lo reportan como un método con una alta habilidad para recuperar el modelo correcto, incluso, en casos donde el número de variables explicativas es mayor que el tamaño de la muestra. Por otra parte, como se indicó anteriormente, uno de los objetivos de este trabajo fue encontrar un procedimiento que seleccione un modelo con buena capacidad de predicción, basado en pocas variables, de modo que se pueda implementar el manejo agronómico por sitio específico de aquellas propiedades relacionadas con producción.

Debido a que el error de predicción en cada uno de los lotes fue similar, la selección de variables se realizó tomando toda el área del campo experimental con un tamaño de muestra total $n = 130$, lo cual es ventajoso para el diseño e implementación de la estrategia de manejo por sitio específico, es decir, pocas variables en áreas grandes. En la Tabla 3.7 se detallan los coeficientes de regresión de las variables relacionadas con el peso de los racimos, usando el método de encogimiento Lasso para seleccionarlas. El modelo final está compuesto por siete variables y la variable con mayor peso, el cual es alto, si se tiene en cuenta que las propiedades del suelo fueron estandarizadas, fue el diámetro ponderado medio de los agregados cribados en seco (DPMS, coeficiente de regresión = -0.96). La relación inversa encontrada puede estar mostrando que hay un deterioro importante de la estructura del suelo y confirma lo que puede observarse en la Tabla 3.3 al comparar la cantidad de agregados finos que tienen los suelos en seco (AFS) y la cantidad de éstos que se produce cuando el suelo es humedecido (AFH). Estos cambios tan drásticos en la agregación del suelo, en presencia de arcillas expansibles, podría estar dañando raíces y afectando la producción (Vaquero 2003).

Otra variable de alto peso en el modelo fue el aluminio ($\beta = 0.71$). Como se mencionó anteriormente, la saturación con aluminio en estos suelos no representa un problema para el banano, y aunque son escasas las evidencias científicas, la relación positiva entre el contenido de aluminio intercambiable en el suelo con el peso del racimo, podría sugerir un efecto negativo de este elemento sobre las poblaciones de patógenos radicales, principalmente nematodos, como lo han sugerido Wang *et al.*

(2008) y Cadet *et al.* (2004). Un efecto similar sobre la población de nematodos podría suponerse para la relación positiva entre hierro y producción (Hu *et al.* 2008, Cha'on *et al.* 2007), así como con el cobre. En el caso de calcio, la relación negativa refuerza la idea de un posible desbalance entre los cationes básicos del suelo (López y Espinosa 1995).

Tabla 3.7. Coeficientes de regresión de variables explicativas del suelo relacionadas con el peso de racimos de banano, seleccionadas a través del método de encogimiento Lasso⁽¹⁾. Variables determinadas en el campo experimental de Augura. Municipio de Carepa. Colombia.

Variable	Coeficientes de regresión
Intercepto	30.41
Arena	-0.13
Aluminio	0.71
Calcio	-0.13
Hierro	0.3
Cobre	0.27
Boro	0.09
DPMS ⁽²⁾	-0.96
ML ⁽³⁾	37.9

⁽¹⁾La función usó un parámetro $\lambda = 11.62$, obtenido por validación cruzada empleando el método dejando uno por fuera (LOO). ⁽²⁾Diámetro ponderado medio de agregados en seco. ⁽³⁾Máxima Verosimilitud de la matriz de covarianza de los residuales.

3.3.7. Análisis espacial

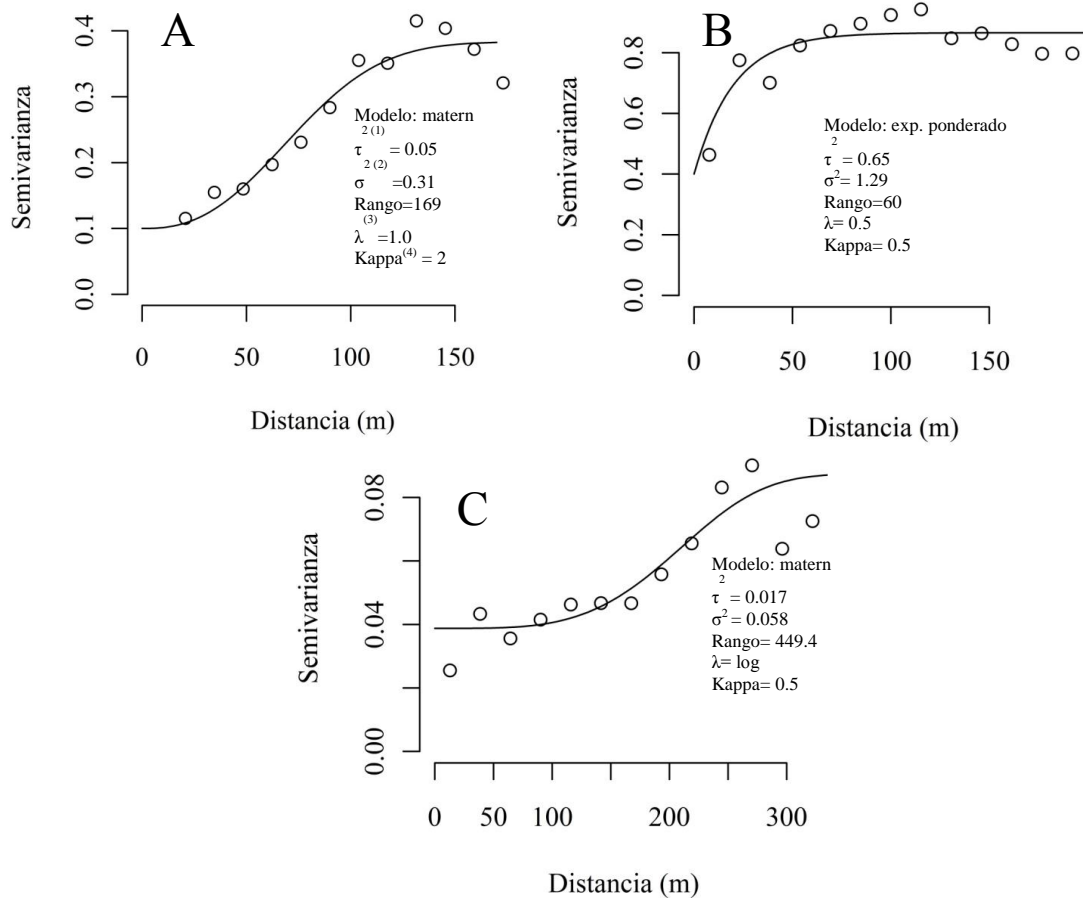
En la Tabla 3.8 se describen los parámetros de los modelos teóricos ajustados a los variogramas experimentales de las siete variables del suelo seleccionadas por su relación con el peso del racimo. Según criterios de Cambardella *et al.* (1994), el diámetro ponderado medio con cribado en seco presentó una fuerte dependencia espacial ($\tau^2/\sigma^2 \leq 25\%$), mientras que la del aluminio y el cobre fue moderada ($25 < \tau^2/\sigma^2 < 75$). La dependencia espacial del calcio fue débil y prácticamente se puede considerar como una propiedad con variabilidad aleatoria, así como el hierro, la arena y el boro.

Tabla 3.8. Parámetros de los modelos teóricos ajustados a los variogramas experimentales de siete propiedades del suelo relacionadas con el peso del racimo, en el campo experimental de Augura. Municipio de Carepa. Colombia.

Variable	Modelo	$\lambda^{(1)}$	Kappa ⁽²⁾	Pepita (τ^2)	Meseta (σ^2)	Proporción ⁽³⁾ (τ^2/σ^2)	$\phi^{(4)}$	Rango (m)	Suma de cuadrados ponderada
DPMS ⁽⁵⁾	Matern	1.0 ⁽⁶⁾	2	0.05	0.31	0.16	31.6	169	6
Aluminio	Exp. Pon. ⁽⁷⁾	0.5	0.5	0.65	1.29	0.50	58.9	60	13.6
Hierro	Pepita puro	0.5	- ⁽⁸⁾	22.51	-	-	-	-	284.7
Cobre	Matern	Log ⁽⁹⁾	0.5	0.017	0.058	0.29	150	449.4	0.6
Arena	Pepita puro	0.5	-	0.936	-	-	-	-	0.17
Calcio	Matern	1.0	2.5	6.5	6.7	0.97	9.2	54.1	1203.1
Boro	Pepita puro	1	-	0	-	-	-	-	0

⁽¹⁾Transformación Box-Cox para normalización de variables. ⁽²⁾Parámetro de forma del variograma. ⁽³⁾Valores <0.25 indican una fuerte dependencia espacial, entre 0.25 y 0.75 indican una moderada dependencia espacial y >0.75 indican leve dependencia espacial (Cambardella *et al.* 1994). ⁽⁴⁾Parámetro de rango. ⁽⁵⁾Diámetro ponderado medio de agregados cribados en seco. ⁽⁶⁾Sin transformación. ⁽⁷⁾Exponencial ponderada. ⁽⁸⁾No aplica para modelo pepita puro. ⁽⁹⁾Transformación logarítmica.

En la Figura 3.4 aparecen los gráficos de los variogramas experimentales y su correspondiente variograma teórico, ajustado para las propiedades del suelo relacionadas con producción y con dependencia espacial moderada y fuerte.



⁽¹⁾Pepita. ⁽²⁾Meseta. ⁽³⁾Transformación Box-Cox para normalización de variables. ⁽⁴⁾Parámetro de forma del variograma

Figura 3.4. Variogramas experimentales y ajustados de las propiedades del suelo relacionadas con producción que presentaron dependencia espacial moderada a fuerte. A. Diámetro ponderado medio del suelo en seco. B. Aluminio intercambiable. C. Cobre disponible.

Los mapas de la Figura 3.5 muestran la distribución espacial de las variables del suelo relacionadas con el peso de los racimos de banano que presentaron alta y moderada dependencia espacial. Las áreas con los agregados de menor tamaño (< 4.2 mm) se encuentran en el lote L4, en el cual se registró el mayor peso promedio de racimos de banano (33 kg), mientras que los lotes L3 y L5 presentan los agregados con tamaños superiores a 4.4 mm (Figura 3.6 A) y en estos lotes se registró la menor producción.

El mapa de la Figura 3.5 B, muestra el estado del aluminio con respecto al punto crítico de $0.3 \text{ cmol (+) kg}^{-1}$, obtenido este por la diferencia entre el valor predicho por interpolación y el punto crítico. Se evidencia que los niveles de aluminio intercambiable sobrepasan en la mayor parte del área el nivel crítico.

De manera similar, la Figura 3.5 C, muestra las deficiencias de cobre en toda el área experimental, usando como punto crítico el punto medio del rango óptimo ($8 \text{ cmol(+)} \text{ kg}^{-1}$). Sólo una pequeña área ubicada en lote L5 está por encima de este nivel, en el resto del campo sería necesario aumentar entre 0.5 y 3 cmol(+) para tener un nivel de cobre adecuado.

El gráfico de burbujas mostrado en la Figura 3.6 D, para los residuales del peso de los racimos, obtenidos por la diferencia entre el peso de los racimos y el valor predicho estimado con el modelo usando el método de selección Lasso. En éste se aprecia que el modelo es eficiente en la extracción de buena parte de la variabilidad espacial del peso de los racimos de banano.

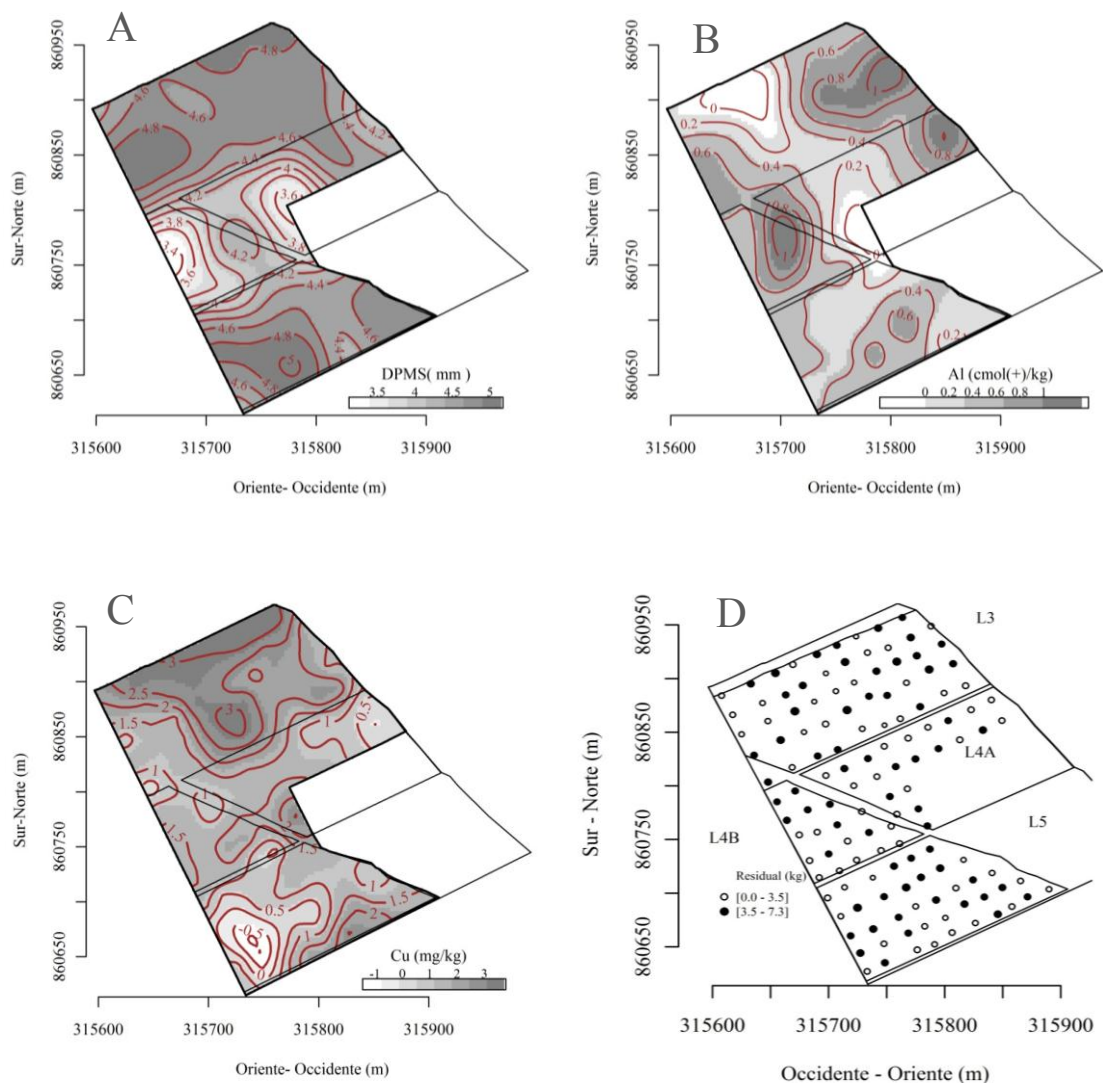


Figura 3.5. Mapas de la distribución de las propiedades del suelo relacionadas con el peso del racimo de banano. A. Mapa del diámetro ponderado medio de agregados. B. Mapa de exceso de aluminio intercambiable tomando como punto crítico $< 0.3 \text{ cmol (+) kg}^{-1}$ para el cultivo de banano. C. Mapa de requerimientos de cobre, tomando como punto crítico, el punto central del rango óptimo (8 mg kg^{-1}). D. Gráfico de burbujas para los residuales del peso de racimos.

3.4. Conclusiones

La variabilidad de la producción de banano puede ser descompuesta por fuentes y éstas pueden ser seleccionadas por mínimos cuadrados. Las fuentes más importantes fueron los lotes y algunas propiedades del suelo dentro de cada uno de éstos.

La selección de las fuentes de variación de la producción de banano por mínimos cuadrados, tiene la desventaja de generar modelos con un alto número de propiedades del suelo, lo que dificulta la implementación de una estrategia de manejo por sitio específico en campo, además de una menor capacidad predictiva

El tipo de suelo no fue un buen factor de extracción de la tendencia espacial en la producción, y su comportamiento parece indicar escalas de variación diferentes en cada uno de ellos.

De los métodos alternos evaluados para seleccionar las propiedades del suelo con una buena precisión de predicción, los métodos de encogimiento y combinaciones lineales, así como el método de avance por etapas, fueron los mejores, aunque los métodos de encogimiento y el método de avance por etapas, permitieron seleccionar un bajo número de propiedades del. El método que finalmente tuvo mejor comportamiento fue el Lasso: fue el más parsimonioso, preciso, y eficiente.

El diámetro ponderado medio del suelo cribado en seco fue la variable con el mayor coeficiente de regresión, en la relación lineal con el peso del racimo de banano, presentando también una dependencia espacial fuerte.

Los contenidos de aluminio, cobre y calcio presentaron una dependencia espacial media y también se asociaron con la producción.

Los niveles de acidez intercambiable del suelo encontrados no representaron un problema para el cultivo de banano en esta finca, pero las relaciones entre las bases parecen estar generando desbalance entre ellas, lo que está alterando la producción.

Bibliografía

1. Arango. L. 2004. Efecto de la Variabilidad Espacial de algunas propiedades fisicoquímicas del suelo relacionadas con la producción de Forraje del pasto angleton (*Dichanthium Aristatum* (Poir) C.E. Hubbard). Tesis Maestría en Geomorfología y Suelos. Facultad de Ciencias. Universidad Nacional de Colombia, Medellín, 77 p.
2. Araya, M. y Calvo, C. 2001. Cantidad de raíces en los 10 cantones productores de Costa Rica. *Corbana* 27(54):47-64.
3. Bertsch, F. 1986. Manual para interpretar la fertilidad de los suelos. San José de Costa Rica: Oficina de publicaciones, Universidad de Costa Rica. 82 p.
4. Barroso, P. F. 1991. Relación entre compactación del suelo y usos de la tierra a niveles de cuencas hidrográficas. río Aquiares. Turrialba. Costa Rica. Tesis Maestría. Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza . Turrialba. Costa Rica. 133 p.
5. Bourennane, H.; Nicoulaud. B.; Couturier. A. y King. D. 2004. Exploring the spatial relationship between some soil properties and wheat yields in two soil types. *Precision. Agriculture*. 5: 521-536.
6. Brejda, J.; Moorman, T.; Smith, J.; Karlen, D.; Allan, D.; Dao, T. 2000. Distribution and variability of surface soils properties at a regional scale. *Soil Sci. Am. J.* 64: 974-982.
7. Cadet, P.; Berry. S.; Spaull. 2004. Mapping of interactions between soils factors and nematodes. *European Journal of Soil Biology*. 40(2): p. 77-86.
8. Cambardella, C. A.; Moorman, T. B.; Parking, T. B.; Karlen, D. L. 1994. Field-scale variability of soil properties in central Iowa soils. *Soil Science Society of America Journal*, J. 58: 1501-1511.

9. Chatterjee, S. y Hadi, A. S. 2006. Regression analysis by example. Fourth Edition. New Jersey: Wiley Interscience, A John Wiley & Sons. Inc. Publication, 375 p.
10. Cha'on, U.; Valmas, N.; Collins, P. J.; Reilly, P. ; Hammock, B.; Ebert, P. 2007. Disruption of iron homeostasis increases phosphine toxicity in *Caenorhabditis elegans*. *Toxicological Sciences*. 96 (1): p. 194-201.
11. Diggle, P. J. y Ribeiro, P. J. 2007. Model-based geostatistics. New York: Springer Science,. 228 p.
12. Espinosa, J. y Mite, F. 2002. Estado actual y futuro de la nutrición y fertilización del banano. *Informaciones Agonómicas*, (48):4:9.
13. Gauggel, C.; Moran, D. y Guardian, E. 2003. Interrelations between the soil chemical properties and the banana plant root systems, p 13-22. Turner D. y Rosales. F. (eds). *Banana root system: toward a better understanding for its productive management*. San José de Costa Rica: Proceedings Inibap. Musalac. Corbana.
14. Gramacy, R. B. 2009. Monomvn: Estimation for multivariate normal and Student-t data with monotone missingness. R package version 1.7-4.
15. Guitierrez, J. C. 2007. Estudio detallado de suelos y clasificación de tierras con fines de riego del Campo Experimental de Augura, Carepa Antioquia, 28 p.
16. Hastie, T.; Tibshirani., R. y Friedman, J. 2008. Linear methods for regression. p. 43-100. *The elements of statistical learning, data mining. inference. and prediction*. Second edition. Springer Series in statistics, 745 p.
17. Hu, Y.; Wang. Y.; Ye, B. Wan, D. Y. 2008. Phenotypic. and behavioral. defects induced by iron exposure can be transferred to progeny in *Caenorhabditis elegant*. *Biomedical and environmental sciences*. 21: 467-473.
18. Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC). 2006. Métodos analíticos del laboratorio de suelos. 6ª Edición. Bogotá, 648 p.
19. Jaramillo, D. 2002. Introducción a la Ciencia del Suelo. [Libro en CD-ROM]. 1ª Edición. Universidad Nacional de Colombia. Medellín.
20. Kahabka, J. E.; Van Es, H. M.; McClenahan, y Cox, W. J. 2004. Spatial analysis of maize response to nitrogen fertilizer in central New York. *Precision Agriculture* 5: 463-476.
21. Lark, R. 2002. Optimized spatial sampling of soil for stimation of the variogram by maximamun likelihood. *Geoderma*, 105: 49-80.

22. López, M. y Espinosa, J. 1995. Manual de nutrición y fertilización del banano. una visión práctica del manejo de la fertilización. Ecuador: Instituto de la potasa y el Fósforo, 81 p.
23. López, C. 1983. Diagnóstico del estado nutricional de plantaciones bananeras. ASBANA. 6 (19): 13-18.
24. Martínez-Trinidad, S.; Cotler, H.; Etchevers-Barra, J. D.; Ordaz-Chaparro, M.; León-González, F. 2008. Efecto del manejo en la agregación del suelo en un ecosistema tropical. En: Terra Latinoamericana. 26 (4): 299-306.
25. Matthew, K. L. 2009. DTK: Dunnett-Tukey-Kramer Pairwise Multiple Comparison Test Adjusted for Unequal Variances and Unequal Sample Sizes. R package version 3.0.
26. Miao, Y.; Mulla, D. J. y Robert, P. C. 2006. Spatial variability of soil properties, corn quality and yield in two Illinois, USA fields: Implications for precision corn management. Precision Agriculture, 7: 5-20.
27. Miller, A. 2002. Subset selection in regression, second edition. New York: Chapman y Hall/CRC Eds.,. 234 p.
28. Montgomery, D. 2001. Design and analysis of experiments, fifth edition. New York: John Wiley & Sons, 684 p.
29. Persson, A.; Pilesjö, P. y Eklundh, L.. 2005. Spatial influence of topographical factors on yield of potato (*Solanum tuberosum* L.) in Central Sweden. Precision Agriculture 6: 341-357.
30. Paz-Gonzalez, A.; Vieira, S.; Taboada, C.M. 2000. The effect of cultivation, on the spatial variability of the selected properties of an umbric horizon. Geoderma, 97 (4-3): 273-292.
31. R Development Core Team 2009. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing. Vienna. Austria. ISBN 3-900051-07-0.
32. Ribeiro Jr.; P.J. y Diggle, P.J.. 2001. geoR: A package for geostatistical analysis. R-NEWS, 1 (2): 15-18, ISSN 1609-3631.
33. Serrano, E.; Sandoval, J.; Pocasangre, L.; Rosales, F.; Delgado, E. 2006. Importancia de los indicadores físico-químicos, en la calidad del suelo para la producción sustentable del banano en Costa Rica. In: Soprano, E.; Tcacenco, F.; Lichtember, L.; Silva, C. XVII Reunião internacional Acobat, memorias, Joinville, Brasil, 2006. p. 207-221.

34. Van Es, H. M.; Yang, C. L. y Geohring, L. D. 2005. Maize nitrogen response as affected by soil type and drainage Variability. Precision. Agriculture 6: 281-295.
35. Vaquero, R. 2003. Soil physical properties and banana root growth. pp. 125-131. Turner D. y Rosales. F. (eds). Banana root system: toward a better understanding for its productive management. San José de Costa Rica: Proceedings Inibap. Musalac. Corbana, 260 p.
36. Vargas, A.; Arias, F.; Serrano, E. Arias, O. 2007. Toxicidad de boro en plantaciones de banano (Musa AAA) en Costa Rica. Agronomía Costarricense, 31 (2): 21-29.
37. Wang, H.; Wick, R.; Xing, B. 2008. Toxicity of nanoparticulate and bulk ZnO. Al₂O₃. and TiO₂ to the nematode *Caenorhabditis elegans*. In Environmental Pollution, 157 (4): 1171-1177.

4. Manejo por sitio específico en el cultivo de banano: Caso de estudio en la región de urabá

Site specific management in banana crop: a study case in Uraba region

Resumen

Con el propósito de diseñar e implementar una estrategia de manejo por sitio específico en banano en 130 sitios ubicados sobre una malla con celdas de 20 x 20 m, en dos épocas (noviembre 2007 y abril 2009), se evaluaron 19 propiedades físicas y 15 químicas del suelo y la cantidad de raíz funcional de la planta ubicada en el sitio. Además, se registró la producción de tres cosechas de esa planta. Sobre la producción y las propiedades se examinó el grado de estructuración espacial de la variabilidad usando el Índice de Moran y se modeló ese comportamiento espacial, mediante semivariogramas. Para las propiedades químicas relacionadas con la producción en la primera cosecha, se diseño e implementó una propuesta de manejo específico para las plantas de la tercera cosecha. En el primer muestreo, siete propiedades explicaron la

producción de la primera cosecha, mientras que en el segundo, seis la producción de la tercera cosecha, siendo consistentes dos propiedades químicas: el cobre y el boro. La producción mostró estructuración espacial en las tres cosechas. Los análisis evidenciaron dependencia espacial fuerte en el peso de los racimos y la razón de variabilidad mostró menor tasa de cambio para la producción de la cosecha tres. En el primer muestreo, diez propiedades físicas y cinco químicas presentaron estructuración espacial y en el segundo solo una propiedad física y diez químicas. El manejo por sitio específico implementado no afectó la producción.

Términos para indexación: agricultura de precisión, métodos de regression, dependencia espacial, propiedades del suelo, manejo agronómico.

Abstract

In order to develop and to establish a strategy of site specific management in banana, on 130 plants labeled on a grid with cells 20 x 20 m , in two seasons (November 2007 and April 2009), nineteen physical properties, fifteen chemical, amount of functional root plants were evaluated, also, there was registered the yield of three harvest. On the production and soil properties are considered the degree of spatial structuring using the Moran Index and spatial behavior through semivariograms. For chemical variables related to yield of the first harvest, was implemented specific management proposal for plant of the third harvest. In the first sampling seven properties explain the yield of the first harvest, while in the second six variables explain the third harvest, being consistent two chemical properties, copper and boron. The yield showed spatial structure in three harvests. Analyses

show strong spatial dependence for the yield and the ratio of variability was lower exchange rate for the yield harvest three. In the first sampling ten properties physical and five chemicals, and in the second sampling one physical and ten chemicals properties showed spatial structure. The site specific management proposal did not affect the banana yield.

Keywords: precision agriculture, regression methods, spatial dependence, soil properties, agricultural management.

4.1. Introducción

La variación de la producción dentro de un campo de cultivo frecuentemente es el resultado de la variación en las características del suelo, de la competencia con las arvenses, de las prácticas de manejo, de la microtopografía y de las posibles interacciones entre éstas. La implementación de prácticas de manejo por sitio específico requiere de la cuantificación y explicación de la variabilidad espacial de la producción en un área determinada (Ritter *et al.* 2008). Así, un programa de manejo por sitio específico para un cultivo se puede definir como el proceso de ajuste de las prácticas de manejo dentro de un campo de acuerdo con la variabilidad espacial de los factores limitantes de la producción (King *et al.* 2005).

Para lograr lo anterior se requiere: primero, identificar y cuantificar cada una de las propiedades relacionadas con los rendimientos del cultivo (Kravchenco y Bullock 2000). Segundo, que las propiedades relacionadas presenten una variabilidad espacial significativa dentro del campo (Plant 2001). Generalmente, cuanto mayor es la

variación espacial de las propiedades, mayor es el rendimiento potencial económico de la aplicación de un programa de manejo por sitio específico, en comparación con el manejo uniforme para una propiedad determinada (Havlin y Heiniger 2009). Tercero, definir adecuadamente, para cada propiedad limitante, zonas de manejo homogéneo, según los requerimientos del cultivo (Diker *et al.* 2004). Y cuarto, implementar el programa de manejo por sitio específico, el cual debe aumentar los rendimientos o generar algún beneficio ambiental para la finca (Plant 2001).

Perry *et al.* (2010) comentan que la mayoría de los programas de manejo por sitio específico se han desarrollado e implementado para sistemas de cultivos anuales. Estos son principalmente cultivos mecanizados tanto en su producción como en la aplicación de los insumos, contrario al manejo casi manual de los sistemas perennes tropicales, limitando los trabajos de manejo por sitio específico en este tipo de sistemas.

Las plantaciones de banano son establecidas en lotes con clones AAA (Araya y Calvo 2001), lo que sugiere una mínima variabilidad biológica entre ellos. Sin embargo, el efecto de las prácticas de manejo, la variabilidad del suelo, el clima, las plagas y las enfermedades se imponen sobre esa homogeneidad (López y Espinosa 1995, Vaquero 2003), afectando directamente los rendimientos, e indirectamente la duración de las fases fenológicas, encontrándose en un lote plantas en todos los estados de desarrollo.

El objetivo del presente trabajo consistió en evaluar la factibilidad de diseñar e implementar un programa de manejo por sitio específico para el cultivo de banano en un lote experimental en Urabá, con base en el manejo de las propiedades del suelo.

4.2. Materiales y metodología

4.2.1. Ubicación

El trabajo se desarrolló en el campo experimental de Augura ($76^{\circ} 40', 15''$ Oeste y $7^{\circ} 47' 35''$ Norte), en el municipio de Carepa, entre el mes de febrero de 2007 y Junio de 2009. El área bananera pertenece a la zona de vida bosque húmedo tropical y se sitúa en la planicie aluvial de piedemonte con pendientes menores al 3 %. Sus suelos se ubican en los ordenes Entisoles e Inceptisoles, pobremente drenados, (IGAC, 2007).

4.2.2. Muestra

El campo experimental cuenta con 36 ha sembradas en banano (*Cavendish* AAA). De éstas se seleccionaron seis, ubicadas en los lotes L3, L4 y L5 de la finca y sembradas en cuadro a 2.5 m con el clon de banano Williams. En éstas se georeferenciaron 130 unidades productivas (plantas), distribuidas en malla con una separación de 20 x 20 m, usando un GPS Trimble GeoxT, ajustado al sistema de proyección UTM WGS84 zona 18 N. En cada unidad se seleccionó una yema sucesora con un tamaño menor a 5 cm eliminando las demás.

4.2.3. Fertilización

El manejo de la nutrición en el campo experimental se hizo utilizando las siguientes fuentes y dosis de nutrientes: nitrógeno (N: 330 kg ha⁻¹ año⁻¹), fósforo (P₂O₅ : 61 kg ha⁻¹ año⁻¹), potasio (K₂O : 501 kg ha⁻¹ año⁻¹), calcio soluble (CaO: 66.5 kg ha⁻¹ año⁻¹), magnesio soluble (MgO: 33 kg ha⁻¹ año⁻¹), azufre (S: 71 kg ha⁻¹ año⁻¹), boro (B: 1.3 kg ha⁻¹ año⁻¹), zinc (Z: kg ha⁻¹ año⁻¹) y materia orgánica (3 kg planta⁻¹ año⁻¹).

4.2.4. Determinación de propiedades

En campo, entre 0 y 5cm de profundidad, se determinó la resistencia a la penetración del suelo a 30, 60 y 100 cm de distancia de la planta en evaluación: CP30, CP60 y CP100, usando un penetrómetro de bolsillo. Con un cilindro metálico biselado con un diámetro de 4,3 cm y una altura de 4,83 cm, se evaluó la densidad aparente del suelo (Da), a una distancia de 30 cm de la planta y entre 5 y 10 cm de profundidad. Se tomó una muestra de suelo sin disturbar de 200 g aproximadamente, a 30 cm de la planta y entre 0 – 15 cm de profundidad, con la cual se determinaron en el laboratorio, tanto en seco como en húmedo, los siguientes índices de estabilidad estructural: el diámetro ponderado medio (DPMS y DPMH), el índice de estructuración (IES y IEH), la cantidad de agregados finos (< 0,5 mm de diámetro) (AFS y AFH) y la cantidad de agregados extremos (> 2 mm y < 0,5 mm de diámetro) (AES y AEH). También se evaluó la retención de humedad gravimétrica del suelo a

capacidad de campo (0,3 atm) y en el punto de marchitez permanente (15 atm) (H0.3 y H15, respectivamente). En cada sitio se tomó una muestra con el barreno, de 1 kg aproximadamente, compuesta de cuatro sub-muestras, ubicadas a 30 cm de distancia de la planta, en direcciones opuestas y ortogonales y a una profundidad entre 0 y 15 cm, sobre la cual se determinaron, en laboratorio, la textura (%): Arena (A), Limo (L) y Arcilla (Ar), la cantidad de arcilla dispersa (%) (ArD), el coeficiente de dispersión (CD) y las variables químicas: pH, contenido de materia orgánica (%) (MO), la capacidad de intercambio catiónico a pH del suelo y a pH 7 (cmol(+) kg⁻¹ suelo) (CICE, CIC7), los contenidos intercambiables (cmol(+) kg⁻¹ suelo) de Ca, Mg, K y Al y los contenidos disponibles (mg kg⁻¹ suelo) de P, S, Fe, Mn, Cu, Zn y B y siguiendo los métodos descritos en IGAC (2006). Para la evaluación de raíces, en cada uno de los 130 puntos y a una distancia de 30cm de la planta, se hizo un hoyo de 18cm de largo, ancho y profundidad, del cual se extrajo el suelo con todas las raíces de banano encontradas en él; se estableció la cantidad de raíces totales (RT) en g.100⁻¹g⁻¹ de suelo y se discriminó el porcentaje de raíces vivas o funcionales (RF) siguiendo la metodología propuesta por Araya y Calvo (2001).

4.2.5. Épocas de muestreo y evaluaciones

Se hicieron dos evaluaciones de las propiedades del suelo. La primera se realizó nueve meses después de la selección de las yemas (noviembre de 2007), en la primera generación de plantas, y la segunda 27 meses después (abril de 2009) en la tercera generación. En ambos casos las determinaciones se realizaron cuando el 50 % de las

plantas de la respectiva generación emitieron su inflorescencia. Se registró la producción en kg de las tres generaciones de plantas.

4.2.6. Análisis estadístico

Descripción general: las propiedades del suelo determinadas en las dos evaluaciones se relacionaron con el peso del racimo de la cosecha de la respectiva generación de plantas, usando el método de encogimiento Lasso (Hastie *et al.* 2008), implementado en el paquete “monomvn” (Gramacy 2010). Las propiedades químicas se contextualizaron de acuerdo con el rango esperado para la región, el cual se estimó usando los resultados de los análisis químicos de 144 fincas suministrados por el programa Banatura de Augura; los límites inferior y superior fueron definidos por “bootstrap”, dado el tamaño pequeño de muestra para los elementos menores, puesto que éstos no fueron determinados en todas la fincas (Canty y Ripley 2010).

Dependencia espacial: se usó el Índice de Moran (I) para determinar el grado de auto correlación espacial como se describe en Perry *et al.* (2010), tanto para la producción obtenida en las tres cosechas, como para las propiedades del suelo determinadas en los dos muestreos. Según los anteriores autores, valores de I positivos, con $p \leq 0.025$ indican dependencia espacial. Además, si $I \approx 1$ y $p \leq 0.025$, la variable de interés presenta estructuración espacial fuerte; si $I \approx -1$ y $p \leq 0.025$, la variable es uniforme y si $I \approx 0$ y $p \geq 0.05$, ésta no presenta autocorrelación. La evaluación del Índice de Moran para auto correlación espacial se realizó utilizando el paquete de R “spdep”(Bivand *et al.* 2010).

A las variables de producción y del suelo que presentaron estructura espacial (Índice de Moran mayor a 0.1 y de $p(Z)$ menor a 0.001), se les estudió el comportamiento espacial a través del semivariograma teórico ajustado al semivariograma empírico, obtenido de las varianzas de los pesos de los racimos ubicados a diferentes distancias. Usando los parámetros del variograma se obtuvo la proporción entre pepita y meseta, como indicador del grado de variabilidad estructurada (Cambardella *et al.* 1994), para lo que se propone la expresión:

$$RVE = \frac{1 - \frac{\tau^2}{\sigma^2}}{R} 100$$

Donde, RVE: razón de variabilidad estructurada por cada 100 m de rango [%/100m], τ^2 : pepita, σ^2 : meseta y R: rango (m). Todos los parámetros son obtenidos del semivariograma ajustado y el RVE es un indicador de la tasa de cambio de la variabilidad estructurada por cada 100 m de rango. Las variables físicas y químicas se estandarizaron y se analizaron siguiendo el procedimiento propuesto por Diggle y Ribeiro (2007). Los semivariogramas y la producción georreferenciada de cada planta en cada cosecha se usaron para predecir la producción de las plantas no muestreadas, ubicadas dentro del lote de estudio en una malla con una separación de 2.5 x 2.5 m entre plantas.

Todos los paquetes anteriormente mencionados fueron implementados para el lenguaje y ambiente de cálculos estadísticos R (R Development Core Team 2010).

4.2.7. Propuesta de manejo por sitio específico

Las propiedades químicas edáficas relacionadas con el peso del racimo en la primera cosecha se ajustaron específicamente en cada planta. Para los elementos menores se usaron los niveles críticos establecidos en Costa Rica para ellos (Bertsch 1986), en el caso de los mayores se usaron los niveles críticos propuestos por Espinosa y Mite 2002, para plátano. Se siguieron estas propuestas debido a que los elementos se determinaron usando los mismos métodos de extracción empleados para la evaluación de menores y mayores respectivamente en este trabajo. Los elementos que necesitaron ajuste se nivelaron así: cal dolomítica (CaO: 33 %, MgO: 14 %) equivalente para neutralizar el aluminio superior a 0.3 cmol(+)/kg, el cobre ajustado a 8.0 mg kg⁻¹ (Bertsch 1986) con EDTA-Cu (12%) y el boro a 0.6 mg kg⁻¹ (Vargas *et al* 2007), con cosmo-ión boro (20.5 % como boro elemental y 67.5% como B₂O₃); el hierro no se ajustó por encontrarse por encima del nivel requerido por la planta.

La aplicación de los correctivos se realizó cuando el 50% de las plantas, en segunda generación, habían emitido su inflorescencia, y las plantas de la tercera, tenían en promedio 1 m de altura. Sobre la misma línea, y a 10 m de distancia de cada planta en evaluación se marcó una planta control bajo el manejo agronómico tradicional de la finca, sobre la que se registró la producción. La segunda determinación de propiedades del suelo se relacionó con la producción de la tercera cosecha, usando el procedimiento anteriormente descrito.

4.3. Resultados y Discusión

4.3.1. Variabilidad de la producción y de las propiedades del suelo

La Tabla 4.1 detalla la producción promedio obtenida en los tres lotes y en tres generaciones consecutivas. La producción de las dos primeras generaciones obtenidas bajo el manejo agronómico tradicional de la finca y la de la tercera con manejo específico por planta. El análisis de varianza no evidenció un efecto significativo del ciclo de cultivo ni de los lotes sobre la producción.

Tabla 4.1. Peso promedio de racimos obtenidos de tres lotes en tres generaciones consecutivas de plantas ubicadas en malla (20 x 20 m). La producción de las dos primeras generaciones obtenidas bajo el mismo manejo agronómico de la finca y la producción de la tercera con manejo por sitio específico.

Ciclo	Lote: L3		DTK ⁽³⁾		Lote: L4		DTK		Lote: L5		DTK	
	Pr (kg)	Int. Con ⁽¹⁾ (α=0.05)	Prom. ⁽²⁾	p<0.05	Pr (kg)	Int. Con (α=0.05)	Prom.	p<0.05	Pr (kg)	Int. Con (α=0.05)	Prom.	p<0.05
1	28.13	±1.88			32.71	±2.01			30.85	±2.10		
2	29.65	±1.98	27.68	a	31.63	±1.71	32.01	a	35.03	±2.57	31.94	a
3	27.68	±1.96			31.7	±1.56			29.95	±2.54		
Control ⁽⁴⁾	27.71	± 2.02	-	a	30.8	± 1.76	-	a	30.66	± 2.56	-	a

⁽¹⁾Intervalo de confianza, obtenido con la T de Student para muestras con media y varianza desconocida. ⁽²⁾Promedio. ⁽³⁾Comparación pareada múltiple de Dunnett-Tukey-Kramer, para tamaños de muestras diferentes (Matthew 2009). ⁽⁴⁾Sólo para tercera generación.

La comparación pareada múltiple de Dunnett-Tukey-Kramer (Matthew 2009), indicó que el lote L3 presentó una menor producción respecto a los lotes L4 y L5, la cual es homogénea, entre ellos.

En la Tabla 4.2 se muestra la magnitud promedia tomada por cada una de las propiedades físicas en los dos muestreos. Se establece si hay diferencias significativas (+) o no (-) usando como fuentes de variación la época de muestreo (E), el lote (L) y el sitio o la planta (S), así como las interacciones entre estos factores.

El factor época de muestreo incidió significativamente sobre la variación promedia de doce propiedades físicas del suelo, de las diecinueve evaluadas, así como sobre la cantidad de raíz funcional. El factor Lote afectó significativamente doce propiedades mientras que el sitio sólo dos propiedades físicas. Las interacciones fueron significativas sólo en dos propiedades.

En la Tabla 4.3 se detallan los rangos del contenido de nutrientes intercambiables, y disponibles así como los de la relación de bases y la saturación con aluminio, tanto en el Campo Experimental, como de los suelos bananeros de la región de Urabá, Colombia. También se muestra el efecto que tienen los factores época de muestreo, lote, sitio y sus interacciones sobre la magnitud promedia de cada una de las propiedades.

Tabla 4.2. Valor promedio de propiedades físicas de la capa arable determinadas en dos muestreos en el Campo experimental de Augura, Municipio de Carepa Colombia.

Variable	Unidad	Campo experimental				Fuentes de variación					
		Muestreo 1 (nov. de 2007)		Muestreo 2 (abril de 2009)		E ⁽²⁾	L ⁽³⁾	S ⁽⁴⁾	E:L ⁽⁵⁾	L:S ⁽⁶⁾	E:L:S ⁽⁷⁾
		Prom.	Int. Conf ⁽¹⁾	Prom.	Int. Conf	Significancia (p<0.05)					
Densidad aparente	g cm ⁻³	1.25	±0.02	1.27	±0.02	- ⁽⁸⁾	+ ⁽⁹⁾	-	-	-	-
Arena		15.15	±0.65	18.65	±0.96	+	-	-	-	-	-
Limo		44.95	±0.58	43.32	±0.68	+	+	+	+	+	+
Arcilla		39.48	±0.79	38.03	±0.84	-	-	-	-	-	-
Arcilla dispersa	%	4.36	±0.35	4.33	±0.45	-	+	-	-	-	-
Humedad 0.3 atm		36.13	±0.65	34.75	±0.61	-	-	-	-	-	-
Humedad 15 atm		23.21	±0.51	22	±0.50	-	-	-	-	-	-
CD ⁽¹⁰⁾		10.76	±0.77	11.61	±1.30	-	+	-	-	-	-
c30 ⁽¹¹⁾		2.28	±0.14	3.26	±0.15	+	-	-	-	-	-
c60 ⁽¹²⁾	Kg cm ⁻²	2.24	±0.14	3.73	±0.14	+	-	-	-	-	-
c100 ⁽¹³⁾		2.11	±0.13	3.71	±0.14	+	-	-	-	-	-
DPMS ⁽¹⁴⁾		4.45	±0.09	3.43	±0.09	+	+	-	-	-	-
DPMH ⁽¹⁵⁾	mm	2.06	±0.14	2.69	±0.12	+	+	-	-	-	-
AFS ⁽¹⁶⁾		3.03	±0.40	3.52	±0.31	+	+	+	+	-	-
AES ⁽¹⁷⁾		81.83	±0.92	35.83	±0.81	+	+	-	-	-	-
IES ⁽¹⁸⁾		22.47	±1.36	34.37	±2.35	+	+	-	-	-	-
AFH ⁽¹⁹⁾	%	44.38	±3.13	14.44	±1.33	+	+	-	-	-	-
AEH ⁽²⁰⁾		79.84	±0.86	37.84	±0.86	+	+	-	-	-	-
IEH ⁽²¹⁾		25.72	±1.35	26.82	±1.37	-	+	-	-	-	-
rf ⁽²²⁾		60.4	±3.97	87.47	±2.59	+	+	-	-	-	-

⁽¹⁾Intervalo de confianza para la media. ⁽²⁾Época de muestreo. ⁽³⁾Lote. ⁽⁴⁾Sitio. ⁽⁵⁾Interacción Época de muestreo por lote. ⁽⁶⁾Interacción lote por sitio. ⁽⁷⁾Interacción Época de muestreo por lote y por sitio. ⁽⁸⁾No significativo p>0.05. ⁽⁹⁾Significativo p<0.05. ⁽¹⁰⁾Coefficiente de dispersión. ⁽¹¹⁾Compactación superficial a 30 cm de la planta. ⁽¹²⁾Compactación superficial a 60 cm de planta. ⁽¹³⁾Compactación superficial a 100 cm de planta. ⁽¹⁴⁾Diámetro ponderado medio de agregados en seco. ⁽¹⁵⁾Diámetro ponderado medio de agregados en húmedo. ⁽¹⁶⁾Agregados finos en seco. ⁽¹⁷⁾Agregados extremos en seco. ⁽¹⁸⁾Índice de estructuración en seco. ⁽¹⁹⁾Agregados finos determinados en húmedo. ⁽²⁰⁾Agregados extremos en húmedo. ⁽²¹⁾Índice de estructuración en húmedo. ⁽²²⁾Raíz funcional.

Desde el punto de vista funcionalista, los rangos, para la mayoría de nutrientes, se ubican dentro de las categorías de la guía para la interpretación de análisis de suelo en el cultivo de banano propuesta por Bertsch (1986) en el caso de menores y por Espinosa y Mite (2002) para el caso de los mayores, al igual que los de las relaciones de equilibrio de bases (López 1983) (Tabla 3.2). Los suelos bananeros de Urabá, presentan una reacción moderada a fuertemente ácida (Troeh y Thompson 2005), sin embargo la saturación con aluminio es baja.

El contenido de hierro fué muy superior al óptimo ($8 - 40 \text{ mg kg}^{-1}$), tanto en la región bananera (161 mg kg^{-1}) como en el campo experimental (muestreo 1 = $150.32 \text{ mg kg}^{-1}$, muestreo 2 = $129.39 \text{ mg kg}^{-1}$), lo que provocó toxicidad con este elemento, principalmente durante la primera fase de crecimiento de las plantas de banano.

El rango propuesto por Bertsch (1986) como óptimo de zinc disponible en el suelo para el cultivo de banano está entre $3.4 - 12 \text{ mg kg}^{-1}$. El contenido de este es bajo, tanto en la región bananera (1.25 mg kg^{-1}), como en el campo experimental (muestreo 1 = 2 mg kg^{-1} , muestreo 2: 2.1 mg kg^{-1}).

El Campo Experimental presenta una relación Ca/K (muestreo 1 = 45.52, muestreo 2 = 33.56) y (Ca+Mg)/K (muestreo 1 = 61.34, muestreo 2 = 47.19), mucho más altas, que las promedio encontradas en la región bananera de Urabá (Ca/K = 15.79 y (Ca+Mg)/K = 21.5), así como, a los sugerido por la literatura para este cultivo (López y Espinosa, 1995).

Tabla 4.3. Rango de nutrientes intercambiables y disponibles, relación de bases, saturación con aluminio, y variabilidad de estos frente a los factores ciclo, lote y sitio, de la capa arable de los suelos de la región bananera de Urabá, Colombia y promedios para el campo experimental de Augura.

Variable	Unidad	Region Bananera					Campo experimental		Variabilidad propiedades					
		Region Bananera			Muestreo 1	Muestreo 2	E ⁽²⁾	L ⁽³⁾	S ⁽⁴⁾	E:L ⁽⁵⁾	L:S ⁽⁶⁾	E:L:S ⁽⁷⁾		
		Lim. Inf. ⁽¹⁾	Prom.	Lim. Inf.	Prom.	Prom.	Significancia (p<0.05)							
Potasio ⁽¹⁰⁾	cmol(+) ⁽¹⁰⁾ kg ⁻¹	0.89	1.07	1.24	0.37	0.57	+ ⁽⁸⁾	- ⁽⁹⁾	-	-	-	-		
Calcio ⁽¹⁰⁾		12.12	14.49	16.85	15.39	13.07	+	+	-	-	-	-		
Magnesio ⁽¹⁰⁾		4.27	5.1	5.94	5.38	5.3	-	-	-	-	-	-		
Aluminio ⁽¹¹⁾		1.31	1.57	1.82	1.06	1.12	-	-	-	-	-	-		
CICE ⁽¹²⁾		18.6	22.22	25.85	22.23	24.15	+	+	+	+	-	-		
CIC7 ⁽¹³⁾		ND ⁽¹⁴⁾	ND	ND	21.76	20.04	+	-	-	-	-	-		
Fosforo ⁽¹⁵⁾	mgkg ⁻¹	15.3	18.29	21.27	10.88	15.77	+	+	-	-	+	-		
Azufre ⁽¹⁶⁾		5.69	6.8	7.91	14.17	37.59	-	-	-	-	-	-		
Hierro ⁽¹⁷⁾		135.06	161.43	187.8	150.32	129.39	+	-	-	-	-	-		
Cobre ⁽¹⁷⁾		7.05	8.42	9.8	6.54	6.6	-	+	-	-	-	-		
Zinc ⁽¹⁷⁾		1.05	1.25	1.45	2	2.1	-	-	-	-	-	-		
Manganeso ⁽¹⁷⁾		8.68	10.38	12.07	21.48	26.65	-	-	-	-	-	-		
Boro ⁽¹⁸⁾		0.12	0.14	0.16	0.25	0.52	+	+	+	+	+	+		
pH ⁽¹⁹⁾		4.13	4.93	5.74	5.13	4.82	+	-	-	-	-	-		
Ca/Mg ⁽²⁰⁾		2.48	2.97	3.45	2.89	2.49	ND	ND	ND	ND	ND	ND		
Ca/K ⁽²¹⁾		13.21	15.79	18.37	45.52	33.56	ND	ND	ND	ND	ND	ND		
Mg/K ⁽²²⁾	4.78	5.71	6.64	15.82	13.62	ND	ND	ND	ND	ND	ND			
(Ca+Mg)/K ⁽²³⁾	17.99	21.5	25.01	61.34	47.19	ND	ND	ND	ND	ND	ND			
Sat Al ⁽²⁴⁾	%	6.36	7.6	8.84	5.09	4.7	ND	ND	ND	ND	ND	ND		
Mat. Org. ⁽²⁵⁾	%	ND	ND	ND	2.02	2.55	+	+	-	-	-	-		

⁽¹⁾Limites obtenidos por bootstrap (Canty y Ripley 2010). ⁽²⁾Época de muestreo. ⁽³⁾Lote. ⁽⁴⁾Sitio. ⁽⁵⁾Interacción época de muestreo por lote ⁽⁶⁾Interacción lote por sitio. ⁽⁷⁾Interacción época de muestreo por lote y por sitio. ⁽⁸⁾Significativo (p<0.05). ⁽⁹⁾No significativo (p>0.05). ⁽¹⁰⁾Extracción con acetato de amonio 1 M. ⁽¹¹⁾Extracción con KCl 1M. ⁽¹²⁾Capacidad de intercambio catiónico efectiva, determinada por suma de cationes. ⁽¹³⁾Capacidad de intercambio catiónico con acetato de amonio a pH 7. ⁽¹⁴⁾No determinado o no aplica. ⁽¹⁵⁾Determinado por el método Bray II. ⁽¹⁶⁾Extracción con fosfato monocálcico 0.008M. ⁽¹⁷⁾Extracción olsen-EDTA. ⁽¹⁸⁾Extracción con agua caliente. ⁽¹⁹⁾Determinado en agua (1:1). ⁽²⁰⁾Relación calcio magnesio. ⁽²¹⁾Relación calcio potasio. ⁽²²⁾Relación magnesio potasio. ⁽²³⁾Relación calcio más magnesio respecto a potasio. ⁽²⁴⁾Saturación con Aluminio. ⁽²⁵⁾Materia orgánica, determinada por el método de Walkley black.

Las amplias relaciones anteriores se están presentando debido a las bajas concentraciones de potasio intercambiable, dado que la relación Ca/Mg se mantiene en un rango adecuado respecto a lo esperado para la región bananera y a lo reportado por los autores anteriormente citados. El factor época de muestreo incidió significativamente en la variación promedia de nueve propiedades químicas, de las quince evaluadas en el Campo experimental, mientras que el factor lote incidió sobre seis. El factor sitio e interacciones entre factores presentaron poca incidencia. En síntesis, la producción tuvo como principal factor de variación los lotes, siendo estable entre ciclos de cosechas, mientras que las propiedades químicas y físicas estuvieron influenciadas por la época de muestreo y los lotes, principalmente.

4.3.2. Relación entre las propiedades del suelo y la producción de banano

En el primer muestreo de suelo, de las propiedades determinadas, siete explicaron la producción de la primera generación, con un RMSPD = 6.57 kg. El diámetro ponderado medio de agregados determinado en seco fue la propiedad con mayor nivel de explicación (coeficiente = - 0.96), seguida por la acidez intercambiable (coeficiente 0.71). En el segundo muestreo, seis propiedades explicaron la producción de la tercera generación, con un RMSPD = 6.91 kg. El diámetro ponderado medio en húmedo (coeficiente = -0.53), el boro (coeficiente = - 0.50) y el cobre (coeficiente = 0.45) fueron las variables más importantes para explicar la producción de esa cosecha (Tabla 4.4).

Únicamente el boro y el cobre se manifestaron como propiedades relacionadas con la producción en ambos ciclos de cosechas. No obstante, el aporte del boro a la relación con la producción fue débil y positivo, en el primer muestreo, mientras que moderado y negativo, en el segundo. En el caso del cobre, hubo un incremento en el aporte a la relación también en el segundo ciclo.

Entre las funciones desempeñadas por el boro en el metabolismo de la planta se encuentran las siguientes: afecta los procesos de florescencia y fructificación, la división celular, la elongación de la raíz y la síntesis de la pared celular; también interviene en el metabolismo del nitrógeno, las proteínas, los aminoácidos, los azúcares, el almidón y de las auxinas, así como en la utilización del calcio (Gupta 2007). A pesar de las múltiples actividades desarrolladas por este micronutriente en la planta, el rango entre la deficiencia y toxicidad es muy pequeño, por lo que se pueden alcanzar niveles excesivos dentro de la planta y perjudicar su crecimiento y producción muy fácilmente.

Por otra parte, el requerimiento de boro en las monocotiledóneas como el banano y el plátano, es tres a cuatro veces menor que en las dicotiledóneas; además, el hecho de tener un solo meristemo, las hace especialmente vulnerables a la susceptibilidad o a la toxicidad (Vargas *et al.* 2007).

Tabla 4.4. Coeficientes de regresión de las propiedades del suelo relacionadas con el peso del racimo de banano, en dos muestreos realizados en el Campo experimental de Augura, Municipio de Carepa, Colombia.

Variable	Muestreo 1 (noviembre 2007)	Muestreo 2 (abril 2009)
	Pr ⁽¹⁾ (Cosecha 1)	Pr (Cosecha 3)
Intercepto	30.41	29.64
Arena	-0.13	-
Aluminio	0.71	-
Calcio	-0.13	-
Fósforo	⁽²⁾	0.17
Hierro	0.31	-
Cobre	0.27	0.45
Boro	0.09	-0.5
DPMS ⁽³⁾	-0.96	-
AES ⁽⁴⁾	-	-0.39
DPMH ⁽⁵⁾	-	-0.53
IEH ⁽⁶⁾	-	0.14
Lambda ⁽⁷⁾	11.62	11.37
ML ⁽⁸⁾	37.9	41.48
RMSPD ⁽⁹⁾	6.57	6.91

⁽¹⁾Peso del racimo de banano. ⁽²⁾Propiedad del suelo no relacionada con el peso del racimo. ⁽³⁾Diámetro ponderado medio de agregados en seco. ⁽⁴⁾Agregados extremos en seco. ⁽⁵⁾Diámetro ponderado medio de agregados en húmedo. ⁽⁶⁾Índice de estructuración del suelo en húmedo. ⁽⁷⁾Parámetro de corte para la selección de variables del suelo relacionadas con peso del racimo, obtenido por validación cruzada usando el método dejando uno por fuera "LOO". ⁽⁸⁾Verosimilitud de la matriz de covarianza de los residuales. ⁽⁹⁾Raíz cuadrada media de los errores de predicción del peso de los racimos de banano, obtenidos por el procedimiento de validación cruzada, dejando uno por fuera, expresado en kg.

En el caso del cobre, se presentó un incremento en el coeficiente para el segundo ciclo respecto al primero, aumentando la importancia de esta propiedad en el modelo general. Kopsell y Kopsell (2007), comentan que la disponibilidad de cobre en el suelo es favorecida por pH bajos. En el campo, el pH disminuyó entre el muestreo uno (5.13) con respecto al segundo (4.82), lo que mejoró la cantidad de cobre disponible, aunque no significativamente; sin embargo, los anteriores autores comentan que cuando hay más hierro y aluminio intercambiable, se puede afectar la absorción del cobre y de ahí su mayor relación con la producción (Tabla 4.4).

La relación inversa entre el tamaño de agregados en seco y en húmedo (DPMS, AES, DPMH) con la producción muestra un deterioro estructural en el suelo. Los altos contenidos de arcillas expansivas (> 35 %) (IGAC 2007) son capaces de cohesionar las partículas del suelo en agregados de consistencia firme a muy firme sin formación de planos naturales de agregación, lo que parece estar incidiendo en la producción (Vaquero 2003, Schaetzl y Anderson 2005).

La estructura del suelo, entendida como la disposición adoptada por las partículas del suelo en agregados de mayor tamaño, constituye el hábitat para la biota, determina el espacio poroso y con este la capacidad de almacenamiento y circulación del agua en el suelo, el crecimiento y desarrollo del sistema radical de las plantas, entre otras muchas funciones. En la estructuración del suelo, el tipo de arcilla juega un papel fundamental, según Warkentin (2008), las partículas de arcillas con alta capacidad de intercambio catiónico (alrededor de los 30 $\text{cmol}(+)\text{kg}^{-1}$), facilitan la floculación de los componentes minerales del suelo, porque estas se mantienen unidas

por moléculas de agua orientadas en torno a los cationes a través de enlaces dipolo-dipolo. La estabilidad en el tamaño y distribución de agregados frente a fuerzas mecánicas o grado de humedecimiento, son parámetros que determinan la susceptibilidad del suelo a la erosión y a la intensidad de la labranza. Las fuerza generadas por el pisoteo y laboreo del suelo hacen que este pierda espacio poroso incrementándose la densidad aparente y alterando la estructura del suelo principalmente al nivel de macro agregados (5mm). Las fuerzas químicas y biológicas presentan su mayor efecto al nivel de micro estructura.

La acidez intercambiable, y las propiedades relacionadas con ésta, fueron importantes para explicar la producción de la primera cosecha pero, no así la de la tercera. El primer muestreo se realizó para un suelo artificialmente drenado atravesando por un período de alta saturación con agua, favoreciendo la reducción del hierro (150 mg kg^{-1}), frente a una mayor favorabilidad de oxidación en la segunda evaluación (Hierro: 129 mg kg^{-1} (Fiedler *et al.* 2007).

La relación positiva encontrada entre el aluminio y la producción en el primer ciclo de cosecha, sugiere un comportamiento contrario al efecto negativo que este catión presenta en las plantas: disturbación del efecto homeostático del calcio, interferencia en el metabolismo del fósforo, y producción de estrés oxidativo, aspectos ampliamente reportados en la literatura (Yost, 2000).

No obstante, muchas especies de plantas tienen un contenido de aluminio foliar de 200 mg kg^{-1} , llegando en algunas, principalmente perennes y maderables tropicales, a acumular hasta 1000 mg kg^{-1} , por lo que se les denomina acumuladoras

de aluminio. Sobre las especies acumuladoras de aluminio se ha encontrado un efecto estimulante del crecimiento con la aplicación de aluminio. En te, por ejemplo, la adición de aluminio y fósforo favoreció la absorción y traslocación de fósforo, así como el crecimiento de la raíz y los brotes. Resultados similares se han obtenido con *Brasica rapa* y con soya, entre otras especies (Miyasaca *et al.* 2007).

Por otra parte, Shew *et al.* (2007) comentan que se puede tener un efecto benéfico del aluminio al causar éste toxicidad en muchos organismos patógenos de las plantas, ayudando a éstas a evitar enfermedades; por ejemplo en *Thielaviopsis basicola*, agente causal de la podredumbre negra de la raíz de muchas plantas, es inhibida la germinación de las esporas y el crecimiento vegetativo con concentraciones de 350 μM de Al a pH 5. Resultados similares se obtuvieron con *Phytophthora infestans*, agente del tizón tardío en el cultivo de la papa, cuando se aplicaron 185 μM de aluminio.

4.3.3. Comportamiento espacial de la producción

El Índice de Moran, en todos los casos, fue positivo y altamente significativo, indicando estructura espacial en la producción en los valores observados en las tres cosechas. La magnitud del índice y su grado significancia aumentan de la cosecha uno a la tres, evidenciando un incremento de la estructuración espacial en éstas (Tabla 4.5).

Tabla 4.5. Índice de Moran y valor p, para evaluar la dependencia espacial de la producción en tres. Datos obtenidos en el Campo Experimental de Augura, Municipio de Carepa, Colombia.

Peso racimo (Pr)	n	Índice de Moran ⁽¹⁾	P < Z
Cosecha 1 ⁽²⁾	130	0.2	<0.001
Cosecha 2	130	0.25	<0.001
Cosecha 3 ⁽³⁾	130	0.33	<0.001

⁽¹⁾Valores de I positivos con $p \leq 0.025$ indican dependencia espacial. Si $I \approx 1$ y $p \leq 0.025$, la estructuración espacial es fuerte. Si $I \approx -1$ y $p \leq 0.025$, la variable es uniforme. Si $I \approx 0$ y $p \geq 0.05$, esta no presenta autocorrelación (Perry *et al.* 2010). ⁽²⁾Pr1 = 30.41 - 0.13 Arena + 0.71Aluminio - 0.13Calcio + 0.31Hierro + 0.27Cobre + 0.09Boro - 0.96DPMS. ⁽³⁾ Pr3 = 29.64 + 0.17Fósforo + 0.45Cobre - 0.5Boro - 0.39AES - 0.53DPMH + 0.14IEH.

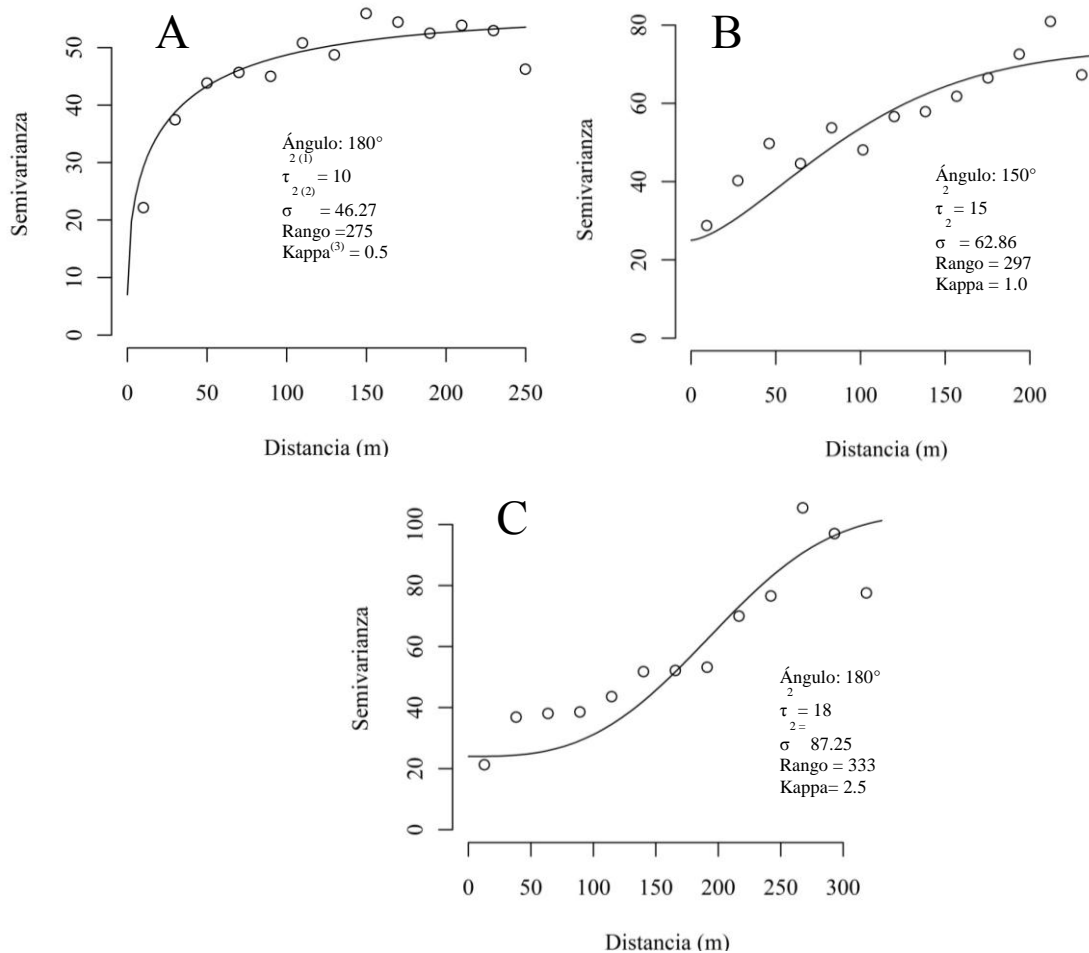
En la Tabla 4.6 se describen los parámetros de los modelos exponenciales ponderados ajustados a los semivariogramas empíricos de la producción georreferenciada de tres cosechas consecutivas y en la Figura 4.1 se muestran tanto los semivariogramas experimentales como teóricos ajustados.

Tabla 4.6. Parámetros de los modelos exponenciales ponderados ajustados a los variogramas experimentales del peso de los racimos de banano de tres cosechas, en el Campo experimental de Augura, Carepa, Colombia.

Cosecha	n	Angulo ⁽¹⁾	Pepita ⁽²⁾ (τ^2)	Meseta ⁽³⁾ (σ^2)	ϕ ⁽⁴⁾	Kappa ⁽⁵⁾	Prop ⁽⁶⁾ (τ^2/σ^2) (%)	Rango ⁽⁷⁾ (m)	RVE ⁽⁸⁾ (%/100m)
1	130	180°	10	46.27	30.7	0.5	21.61	275.55	28.44
2	130	150°	15	62.86	99.16	1	23.86	297.05	25.63
3	130	180°	18	87.25	214.72	2.5	20.63	333.03	23.81

⁽¹⁾Ángulo de anisotropía. ⁽²⁾Variabilidad aleatoria o error de medición. ⁽³⁾Variabilidad total. ⁽⁴⁾Tasa a la cual la correlación decae a cero por el aumento de la distancia entre dos puntos. ⁽⁵⁾Parámetro de forma de la función de correlación. ⁽⁶⁾Relación entre el efecto pepita y la meseta. Valores <25% indican una fuerte dependencia espacial, entre 25 y 75 % indican una moderada dependencia espacial y > 75 % indican una leve dependencia espacial (Cambardella *et al.*, 1994). ⁽⁷⁾Distancia a la cual la semivarianza se estabiliza. ⁽⁸⁾Razón de la variabilidad estructurada.

Los semivariogramas ajustados, no presentaron tendencia espacial relacionada con los ejes (ubicación), pero si se evidenció anisotropía, es decir, el peso de los racimos dependió de la dirección. La mayor variación se presentó para un ángulo de 180° en las cosechas uno y tres y de 150° para la cosecha 2.



⁽¹⁾Pepita. ⁽²⁾Meseta. ⁽³⁾Parámetro de forma del variograma

Figura 4.1. Variogramas experimentales del peso de los racimos de banano de tres cosechas y modelo exponencial ajustado a estos. A. Variogramas con pesos de racimos de primera cosecha. B. Variogramas con pesos de racimos de segunda cosecha. C. Variogramas con pesos de racimos de tercera cosecha

La producción en las tres cosechas presentó una dependencia espacial fuerte ($\tau^2/\sigma^2 < 25\%$) (Cambardella *et al.* 1994), con un aumento de la variabilidad total de alrededor del 30 %, entre cosechas; el rango también aumentó en el mismo sentido, pero en diferente proporción.

La razón de variabilidad estructurada (RVE) muestra una mayor concentración de ésta en la primera cosecha con respecto a las demás. Este indicador muestra, además, que cuando el RVE es alto (cosecha 1: 41 %/100m) el número de unidades homogéneas de producción también lo es, lo que reduce sus áreas, y viceversa: para un RVE bajo (cosecha 3: 24 %/100m), el número de unidades homogéneas de producción fue menor con áreas más grandes (Figura 4.2).

En la cosecha tres la densidad de isolíneas es menor que en las cosechas dos y uno, y en la cosecha dos menor que en la uno (Figura 4.1 a, b y c). Esto es importante a la hora de definir las unidades de manejo, sobre todo en cultivos con aplicación manual de insumos. Un alto número de unidades de manejo dificulta la implementación de la agricultura de precisión debido a la variación en la composición y/o combinación de insumos a aplicar. Por otra parte el patrón espacial de la producción se mantiene estable entre las cosechas, con una mejor delineación en la tercera.

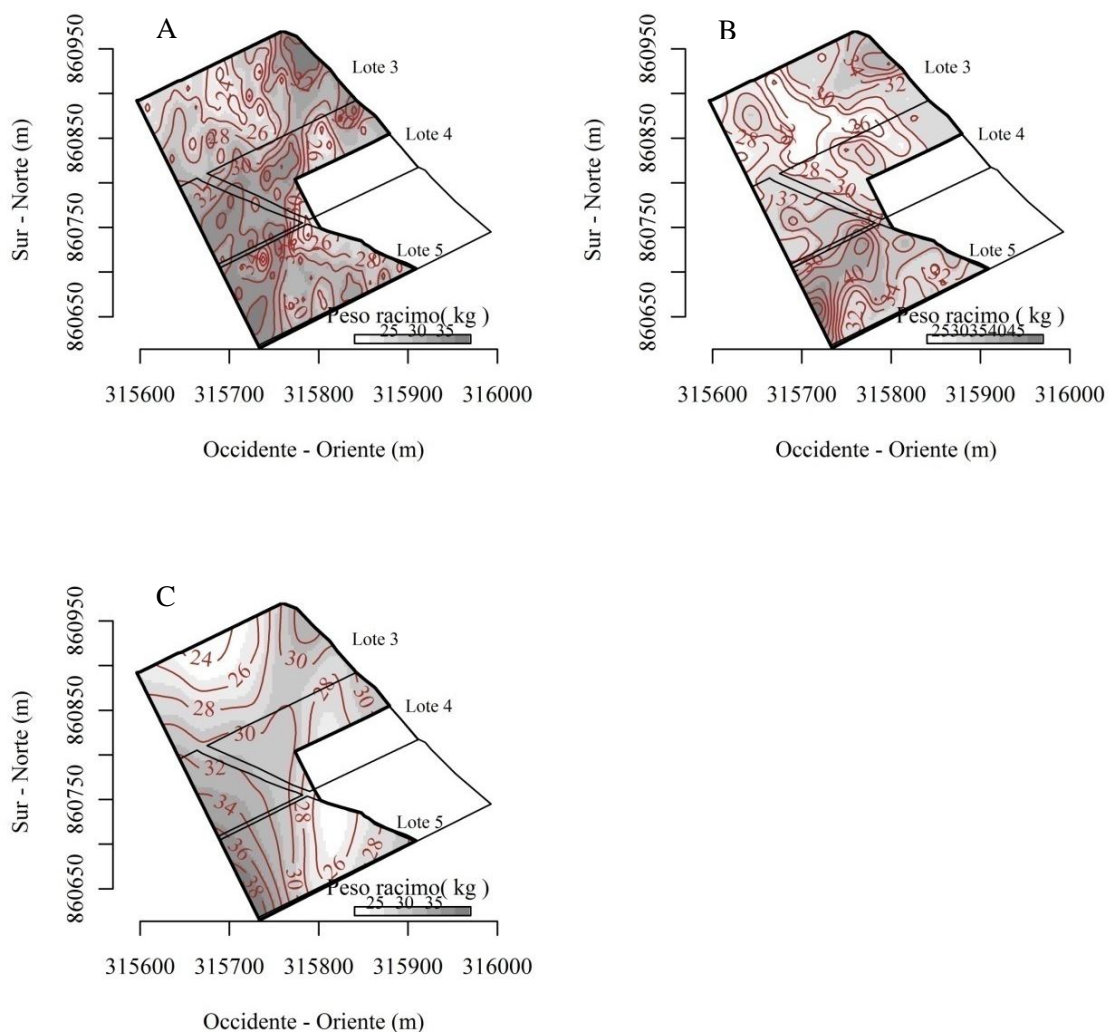


Figura 4.2. Mapas de isolíneas de producción de banano obtenidos por kriging, en el Campo experimental de Augura, Carepa, Colombia. Mapas en coordenadas planas bajo el sistema de proyección WGS 84 zona 18 N. A. Producción primera cosecha, RMSPD (Raíz cuadrada media de los errores de predicción de la validación cruzada) = 6.22 kg. B. Producción segunda cosecha, RMSPD = 6.75 kg. C. Producción tercera cosecha, RMSPD = 5.90 kg.

4.3.4. Comportamiento espacial de propiedades físicas y químicas del suelo

El valor del Índice de Moran, y el valor p de cada una de las propiedades químicas y físicas del suelo, evaluadas en los dos muestreos, se detallan en la Tabla 4.7. En el primer muestreo, diez propiedades físicas y cinco químicas presentaron estructuración espacial (Índice de Moran > 0.1 y $p |Z| < 0.001$), mientras que en el segundo sólo una propiedad física y diez químicas presentaron evidencia de estructuración espacial y sólo la arena, la capacidad de intercambio catiónico efectiva y el cobre disponible fueron consistentes en los dos muestreos.

Los parámetros de los semivariogramas ajustados a los variogramas experimentales para las variables que presentaron estructuración espacial aparecen en la Tabla 4.8. A diferencia de la producción, el patrón de estructuración espacial de las propiedades del suelo no fue consistente en las dos evaluaciones.

Al respecto, Prasolova et al. (2000), evaluando la variabilidad espacio-temporal de la humedad de suelo en la capa superficial (0 – 10 cm) y de diez propiedades químicas en dos parcelas de *Araucaria cunninghamii*, a diferentes escalas de muestreo en Australia subtropical, encontraron que sólo las variables nitrógeno y fósforo disponible en la parcela uno presentaron patrones de variabilidad espacial consistentes entre la estación seca y húmeda, aunque menos evidente en la segunda.

Tabla 4.7. Índice de Moran y probabilidad del estadístico Z ($p(Z)$), para evaluación de la dependencia espacial en propiedades químicas y físicas del suelo y de raíz funcional, determinadas en el Campo Experimental de Augura, Municipio de Carepa, Colombia.

Variable	Muestreo 1 (Noviembre 2007)		Muestreo 2 (abril de 2009)	
	Índice de Moran ⁽¹⁾	p (z)	Índice de Moran	p (z)
Arena	0.15	4.8 x10 ⁻⁴	0.19	1.0 x10 ⁻⁵
Limo	0.13	0.002	0.07	0.046
Arcilla	0.23	1.7 x10 ⁻⁷	0.14	0.001
Arcilla dispersa	0.14	3.9 x10 ⁻⁴	0.08	0.026
Coefficiente dispersión	0.22	7.5 x10 ⁻⁷	0.08	0.033
Humedad 0.3 atm	0.15	5.4 x10 ⁻⁴	0.13	0.001
Humedad 15 atm	0.17	1.1 x10 ⁻⁴	0.06	0.079
Densidad aparente	0.14	6.8 x10 ⁻⁴	0.07	0.053
Compactación a 30 cm	0.02	0.257	0.02	0.279
Compactación a 60 cm	0.07	0.058	-0.01	0.549
Compactación a 100 cm	0.05	0.122	0.00	0.426
Diámetro ponderado medio seco	0.39	2.2 x10 ⁻¹⁶	0.12	0.004
Diámetro ponderado medio húmedo	0.16	2.1 x10 ⁴	-0.01	0.520
Agregados finos seco	0.13	0.002	0.09	0.022
Agregados finos húmedo	0.20	7.8 x10 ⁻⁶	-0.01	0.512
Agregados extremos seco	0.09	0.023	0.02	0.279
Agregados extremos húmedo	0.10	0.009	-0.03	0.673
Índice de estructuración seco	0.11	0.006	0.06	0.078
Índice de estructuración húmedo	0.09	0.021	0.04	0.183
Raíz Funcional	0.11	0.006	0.13	0.0015
pH	0.06	0.073	0.57	2.2 x10 ⁻¹⁶
Potasio	0.02	0.247	0.16	1.5 x10 ⁻⁴
Calcio	0.12	0.003	0.20	4.9 x10 ⁻⁶
Magnesio	0.06	0.073	0.27	2.2 x10 ⁻⁹
Aluminio	0.07	0.041	0.47	2.2 x10 ⁻¹⁶
CICE ⁽²⁾	0.14	7.8 x10 ⁻⁴	0.18	6.0 x10 ⁻⁵
CIC7 ⁽³⁾	0.09	0.017	0.11	0.007
Fosforo	0.23	3.1 x10 ⁻⁷	0.04	0.143
Azufre	-0.03	0.674	0.06	0.017
Hierro	0.08	0.041	0.44	2.2 x10 ⁻¹⁶
Cobre	0.19	1.4 x10 ⁻⁵	0.25	5.3 x10 ⁻⁸
Zinc	0.25	2.9 x10 ⁻⁸	0.07	0.046
Manganeso	0.07	0.055	0.41	2.2 x10 ⁻¹⁶
Boro	0.07	0.044	0.35	3.3 x10 ⁻¹⁵
Materia Orgánica	0.20	4.5 x10 ⁻⁶	0.09	0.020

⁽¹⁾Valores de I positivos con $p \leq 0.025$ indican dependencia espacial. Si $I \approx 1$ y $p \leq 0.025$, la estructuración espacial es fuerte. Si $I \approx -1$ y $p \leq 0.025$, la variable es uniforme. Si $I \approx 0$ y $p \geq 0.05$, esta no presenta autocorrelación (Perry *et al.* 2010). ⁽²⁾Capacidad de intercambio catiónico efectiva del suelo. ⁽³⁾Capacidad de intercambio catiónico a pH 7.

Cassel (1983) también encontró variaciones temporales y espaciales significativas en nueve propiedades físicas evaluadas en la capa arable (0 – 14 cm) de un suelo Typic Paleudult, al relacionar la variación temporal con las prácticas de labranza usadas para controlar arvenses y para incorporar enmiendas al suelo. En nuestro caso, la primera evaluación de las propiedades del suelo se hizo en una época de exceso de agua y la segunda en una época de sequia, lo que influye, por un lado, en los procesos oxidoreductores en el suelo y por el otro sobre las propiedades físicas del suelo sobre la concentración y disponibilidad de elementos (nutrientes o no) en la solución del suelo para la planta.

En cuanto al grado de dependencia espacial en campo, en el primer muestreo, una variable química (cobre) presentó dependencia espacial fuerte (proporción < 25%), cinco propiedades físicas y cuatro químicas presentaron dependencia espacial moderada (Proporción entre 25 y 75 %) y las restantes débil (proporción >75%) (Cambardella *et al.* 1994). En el segundo muestreo cuatro propiedades químicas presentaron dependencia espacial fuerte y cuatro moderada, en las demás la dependencia fue débil incluyendo el contenido de arena.

A diferencia de la producción, que presentó un comportamiento promedio y de estructuración espacial estable entre ciclos de cosechas, las propiedades físicas y químicas del suelo fueron afectadas por la época de muestreo, tanto en su comportamiento promedio, como en su estructura espacial.

Tabla 4.8. Parámetros de los modelos teóricos ajustados a los variogramas experimentales para las variables del suelo estandarizadas, con variabilidad espacial estructurada (Índice de moran > 0.1 y $p|Z| < 0.001$). Variables determinadas en dos épocas de muestreo y en 130 sitios en el Campo experimental de Augura, Municipio de Carepa, Colombia.

Variables	Función de correlación	Ángulo	Pepita (τ_2)	Meseta (σ_2)	Phi ⁽¹⁾ ϕ	Kappa ⁽²⁾	Prop ⁽³⁾ (τ_2/σ_2)	Rango (m)	RVE ⁽⁴⁾ (% /100 m)	SCP ⁽⁵⁾
Muestreo 1 (noviembre de 2007)										
Variables Físicas										
Arena	Matern	90°	0.50	0.71	73.18	0.50	70.4	219.24	13.51	16.91
Arcilla	Matern	90°	0.26	0.91	14.76	1.50	29.2	70.01	101.18	19.90
Arcilla dispersa	Matern	90°	0.76	1.42	100.76	2.00	53.84	540.93	8.53	17.40
CD ⁽⁶⁾	Matern	Omnidireccional	0.79	0.86	148.60	1.50	92.49	704.94	1.06	22.48
Humedad 0.3 atm	Matern	Omnidireccional	0.86	1.06	183.67	1.50	81.20	985.98	1.91	18.86
Humedad 15 atm	Matern	90°	0.50	0.60	20.59	1.50	82.97	97.69	17.43	11.92
Densidad aparente	Matern	Omnidireccional	0.45	0.67	26.53	1.00	67.39	106.09	30.74	8.23
DPMS ⁽⁷⁾	Exp. Pon	Omnidireccional	0.38	1.05	80.84	1.50	36.41	167.99	37.85	37.81
DPMH ⁽⁸⁾	Exp. Pon	Omnidireccional	0.40	0.70	38.16	1.00	57.31	114.33	37.34	11.47
AFH ⁽⁹⁾	Lineal	Omnidireccional	0.70	- ⁽¹⁰⁾	-	-	-	-	-	62.31
Variables Químicas										
CICE ⁽¹¹⁾	Matern	150°	0.40	0.75	27.12	0.5	53.16	81.26	57.65	27.02
Fosforo	Matern	150°	0.61	1.15	127.80	1.0	52.85	511.02	9.23	26.32
Azufre	Exp. Pon	Omnidireccional	0.72	2.07	406.28	2.0	34.98	703.20	9.25	53.24
Cobre	Matern	150°	0.45	2.91	120.34	2.5	15.46	712.25	11.87	90.40
Materia Orgánica	Exp. Pon	Omnidireccional	0.55	0.90	142.87	1.0	61.27	428.01	9.05	67.67
Muestreo 2 (abril de 2009)										
Variables Físicas										
Arena	Matern	Omnidireccional	0.50	0.60	59.38	0.50	83.06	177.89	9.52	66.76
Variables Químicas										
pH	Exp. Pon	Omnidireccional	0.30	2.12	227.23	2.0	14.16	393.29	21.83	171.93
Potasio	Matern	Omnidireccional	0.50	0.68	60.77	0.5	73.34	545.39	4.89	20.18
Calcio	Exp. Pon	150°	0.67	0.77	176.61	1.5	87.93	367.01	3.29	72.95
Magnesio	Exp. Pon	150°	0.50	0.54	34.78	1.5	92.30	72.28	10.65	17.70
Aluminio	Exp. Pon	Omnidireccional	0.30	2.90	290.27	2.0	10.33	502.41	17.85	385.61
CICE	Exp. Pon	150°	0.79	1.09	270.20	2.0	72.55	467.67	5.87	56.59
Hierro	Exp. Pon	Omnidireccional	0.40	1.56	204.51	2.0	25.00	204.51	36.38	174.92
Cobre	Exp. Pon	Omnidireccional	0.50	0.67	83.69	1	74.86	250.71	10.03	158.31
Manganeso	Exp. Pon	150°	0.50	2.10	218.81	2.0	23.85	378.73	20.11	57.82
Boro	Exp. Pon	150°	0.50	1.63	195.60	2.0	30.74	338.55	20.46	82.17

⁽¹⁾Tasa a la cual la correlación decae a cero. ⁽²⁾Parámetro de forma. ⁽³⁾Relación entre pepita y la meseta. Valores < 25% indican fuerte dependencia espacial, entre 25 y 75 % indican moderada dependencia espacial y > 75 % indican leve dependencia espacial (Cambardella *et al.*, 1994). ⁽⁴⁾Razón de variabilidad estructurada. ⁽⁵⁾Suma de cuadrados ponderada. ⁽⁶⁾Coefficiente de dispersión. ⁽⁷⁾Diámetro ponderado medio determinado en seco. ⁽⁸⁾Diámetro ponderado medio determinado en húmedo. ⁽⁹⁾Agregados finos (< 0.5mm) determinados en húmedo. ⁽¹⁰⁾No aplica para ese tipo de modelo. ⁽¹¹⁾Capacidad de intercambio catiónico efectiva.

El efecto de los ciclos de cosecha sobre la producción, tiene como factor causal principal el clima y está bien documentado el efecto de este factor sobre la producción de muchos cultivos (Awotoye y Matthew 2010, Wu *et al.* 2003).

El cultivo de banano no es la excepción, sin embargo, las mayores diferencias parecen presentarse más por ciclos, que entre años consecutivos. Serrano (2006), muestra la producción histórica nacional de Costa Rica, así como discriminada en seis zonas de producción, y se observan tendencias con cambios drásticos en la producción en periodos de seis años.

Las propiedades químicas del suelo parecen ser más sensibles al efecto del clima entre períodos de muestreo que la producción. Al respecto Fiedler *et al.* (2007), argumentan que sólo se requiere un par de semanas bajo condiciones de humedecimiento del suelo o de sequía para que cambien los procesos oxido-reductores en éste, así como la consistencia del mismo (Vaquero, 2003), lo que probablemente está influyendo en la magnitud promedia y en la estructuración espacial de las propiedades del suelo de un ciclo a otro.

Los suelos bananeros son disturbados por procesos como compactación por el pisoteo frecuente de operarios, dada la alta cantidad de actividades requeridas por el cultivo, disturbación de la capa arable por actividades de descompactación manual alrededor de las unidades de producción, incorporación de enmiendas y de materia orgánica, uso intensivo de fertilizantes y herbicidas. Estos factores probablemente están jugando un papel importante en los cambios de la estructuración espacial de las propiedades del suelo encontradas entre las dos evaluaciones.

4.3.5. Manejo por sitio específico de variables químicas

El manejo específico para las variables químicas aluminio, cobre y boro implementado en cada planta no afectó la producción respecto al control ni respecto a las cosechas anteriores en ninguno de los lotes (Tabla 4.1). Los contenidos de aluminio, tanto en la región bananera ($1.57 \text{ cmol}(+) \text{ kg}^{-1}$), como en el campo experimental (muestreo 1= $1.06 \text{ cmol}(+) \text{ kg}^{-1}$, muestreo 2= $1.12 \text{ cmol}(+) \text{ kg}^{-1}$) son mayores que el nivel crítico ($0.3 \text{ cmol}(+) \text{ kg}^{-1}$) (Bertsch 1986), sin embargo parecen no afectar la producción por la baja proporción de la acidez intercambiable (saturación aluminio: muestreo 1 = 5.9 %, muestreo 2 = 4.7 %) respecto a las bases, en el complejo de intercambio. La disponibilidad de cobre aumenta a $\text{pH} < 6$ debido a que se incrementa la concentración de Cu^{+2} en la solución del suelo (Kopsell y Kopsell 2007). El pH del suelo del campo experimental (muestreo 1 = 5.3, muestreo 2 = 4.82) presenta condiciones óptimas para mantener concentraciones adecuadas de cobre disponible para atender las necesidades de las plantas: en consecuencia, la ausencia de respuesta en producción al aplicarlo. El ajuste de la variable boro no afectó significativamente la producción, pero sí se relacionó con ésta, aunque de manera inversa, lo que indica que el nivel crítico para este nutriente, propuesto en Vargas *et al.* (2007), es alto para los suelos de la región bananera en Urabá y se sugiere usar el rango propuesto en este trabajo. En resumen, a pesar de que la función de producción permitió identificar las variables químicas limitantes, el rendimiento no respondió a los nutrientes incluidos y manejados por sitio específico en este

estudio. Resultados similares fueron obtenidos por Färe *et al.* (2009) en *Arachis hipogea*, quienes a través de una función producción identificaron las variables químicas limitantes de los rendimientos en el cultivo de maní y sin embargo el ajuste por sitio específico no generó respuesta en los rendimientos.

A pesar de la no respuesta en producción, el análisis de costos de los insumos aplicados por sitio específico, frente al manejo convencional por promedio, asumiendo mano de obra constante por aplicación, muestra en la propuesta de manejo por sitio específico una reducción del 10 % en la cantidad de fertilizantes y un porcentaje similar en los costos. En el 20 % de las plantas en evaluación solo se requirió un manejo de sostenimiento puesto que el suelo presentaba condiciones adecuadas (por encima de los niveles críticos) lo que redundó en menores costos.

La reducción en el uso de fertilizantes trae beneficios ambientales en términos de una menor eutrofización del agroecosistema bananeros y ecosistemas asociados con este.

Aunque no se efectuó ninguna propuesta de manejo por sitio específico para las variables físicas, éstas parecen estar jugando un papel importante, evidenciado en su relación con el peso del racimo en los dos muestreos realizados. Se recomienda desarrollar investigaciones relacionadas con la implementación de prácticas que permitan manejar este tipo de variables en este cultivo.

4.4. Conclusiones

El método de regresión Lasso usado, permitió seleccionar un conjunto pequeño de variables para los dos muestreos que se relacionan con la producción, presentando un error medio de predicción similar para las dos cosechas evaluadas en las cuales se estableció la relación.

Para el primer muestreo, el diámetro ponderado medio del suelo determinado en seco jugó un papel importante en la explicación de la producción, seguido de la acidez intercambiable. Sin embargo, no fueron consistentes para el segundo muestreo en el cual el diámetro ponderado medio determinado en húmedo, el boro y el cobre fueron las propiedades más relevantes.

Se evidenció que la producción presentó una estructuración espacial consistente entre las cosechas, tanto en el Índice de Moran como en los parámetros de los variogramas. Además, la razón de variabilidad tuvo menor tasa de cambio para la tercera cosecha mostrando que es un buen indicador para establecer zonas de manejo, sobre todo en cultivos operados manualmente.

La estructuración espacial no fue consistente para las propiedades del suelo entre los muestreos y la propuesta de manejo por sitio específico no afectó la producción.

Bibliografía

1. Araya, M. y Calvo, C. 2001. Cantidad de raíces en los 10 cantones productores de Costa Rica. *Corbana* v. 27, No. 54, p. 47-64.
2. Awotoye, O.O. y Matthew, O.J. 2010. Effects of temporal changes in climate variables on crop production in tropical sub-humid South-western Nigeria. *African Journal of Environmental Science Technology*, 4(8):500-505.
3. Bertsch, F. 1986. Manual para interpretar la fertilidad de los suelos. San José, Oficina de publicaciones, Universidad de Costa Rica, 82 p.
4. Bivand, R.; Altman, M.; Anselin, L.; Assunção, R.; Berke O.; Bernat, A.; Blankmeyer, E.; Carvalho, M.; Chun, Y.; Christensen, B.; Dormann, C.; Dray, S.; Halbersma, R.; Krainski, E.; Lewin-Koh, N. Li, H.; Ma, J.; Millo, G.; Mueller, W.; Ono, H.; Peres-Neto, P.; Piras G.; Reder, M.; Tiefelsdorf, M. y Yu D. (2010). *spdep: Spatial dependence: weighting schemes, statistics and models*. R package version 0.5-11.
5. Cambardella, C. A.; Moorman, T. B.; Parkin, T. B.; Karlen, D. L. 1994. Field-scale variability of soil properties in central Iowa soils. *Soil Science Society of America Journal*, J. 58: 1501-1511.
6. Canty, A. y Ripley, B. 2010. *Boot: Bootstrap R (S-plus) Functions*. R packages version 1.2-42.
7. Cassel, D. K. 1983. Spatial and temporal variability of soil physical properties following tillage of norfolk loamy Sand. *Soil Science Society of America Journal*. 47 p. 196-201.
8. Diggle, P. J. y Ribeiro, Jr. P. 2007. *Model-based geostatistics*. Ed. Springer, Series in statistics, New York, 228 p.
9. Diker, K.; Heermann, D. F. y Brodahl M. K. 2004. Frequency analysis of yield for delineating yield responses zones. *Precision Agriculture*, 5, p. 435-444.
10. Espinosa, J. y Mite, F. 2002. Estado actual y futuro de la nutrición y fertilización del banano. *Informaciones Agonómicas*, (48):4:9.
11. Färe, R.; Wang, C.; Schubert, A.; Bronson, K. Johnson, J. 2009. Site-specific management of limiting nutrients in peanut (*Arachis hypogaea*) on texas high plains. *Precision Agriculture*, 10, Issue 4, p. 331-341.
12. Gramacy, R. 2010. *monomvn: estimation for multivariate normal and Student-t data with monotone missingness*. R package version 1.8-3.

13. Gupta, U. 2007. Boron, pg. 241-269. Barker, A. y Pilbean, D.J. Handbook of plant nutrition. New York: CRC Taylor y Francis group, 613 p.
14. Fiedler, S.; Vepraskas, M. J. y Richardson, J. L. 2007. Soil redox potential: importance, field measurements and observation. *Advances in Agronomy*, 94. p. 2- 44.
15. Hastie, T.; Tibshirani, R. y Friedman, J. 2008. Linear methods for regression, p. 43-100. *The elements of statistical learning, data mining, inference, and prediction*. Second edition, Springer Series in statistics, 745 p.
16. Havlin, J. y Heiniger R. 2009. A variable-rate decision support tool. *Precisión Agriculture*, 10, Issue 4, p. 356-369.
17. Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC). 2006. *Métodos analíticos del laboratorio de suelos*. 6ª Edición, Bogotá, 648 p.
18. Instituto Geográfico Agustín Codazzi, 2007. *Estudio semidetallado de suelos de las áreas potencialmente agrícolas, Urabá departamento de Antioquia*. Ed. IGAC, Bogotá, 439 p.
19. King, J. A.; Dampney, P. M. R.; Lark, R. M.; Wheeler, H. C.; Bradlely, R. I. y Mayr, T. R. 2005. Mapping potential crop management zones within fields: Use of yield-map series and patterns of soil physical properties identified by electromagnetic induction sensing. *Precision Agriculture*, 6, p. 167-181.
20. Kopsell, D. E. y Kopsell, D. A. 2007. Copper p. 293- 329. Barker, A. y Pilbean, D.J. Handbook of plant nutrition. New York: CRC Taylor y Francis group, 613 p.
21. Kravchenko, A. N. y Bullock, D. G. 2000. Spatial variability, correlation of corn and soybean grain yield with topography and soils properties. *Agron. J* (92 p 75-83).
22. López, M. y Espinosa, J. 1995. *Manual de nutrición y fertilización del banano, una visión práctica del manejo de la fertilización*. Instituto de la potasa y el Fósforo, Ecuador, p. 81.
23. Miyasaka, S. C.; Hue, N.V. y Dunn, M. 2007. Aluminum, p. 439-497. Barker, A. y Pilbean, D.J. Handbook of plant nutrition. New York: CRC Taylor y Francis group, 613 p.
24. Perry, E. M; Dezzani, R. J.; Seavert, C. F. . y Pierce, F. J. 2010. Spatial variation in tree characteristics and yield in a pear orchard. *Precision Agriculture*, 11, p. 42-60.

25. Plant, R. E. (2001). Site-specific management: The application of information technology to crop production. *Computers and Electronics in Agriculture*, 30, 9–29.
26. Prasolova, N. V.; Xu, Z. H.; Saffigna, P. G. y Dieters, M. J. 2000. Spatial-temporal variability of soil moisture, nitrogen availability indices and other chemical properties in hoop pine (*Araucaria cunninghamii*) plantations of subtropical Australia. *Forest Ecology and Management*. 136, Issues 1-3, p. 1-10.
27. Ritter, C.; Dicke, D.; Weis, M.; Oebel, H.; Pipecho, H. P.; Büchse, A.; y Gerhards, R. 2008. An on-farm approach to quantify yield variation and to derive decision rules for site-specific weed management. *Precision agriculture*. 9, p. 133-146.
28. R Development Core Team, 2010. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation Statistical Computing, Viena, Austria. ISBN 3-900051-07-0.
29. Schaetzl, R. J. y Anderson, S. 2005. *Soils: Genesis and Geomorphology*. Cambridge University Press, New York, 817 p.
30. Serrano, E. 2003. Relationship between functional root content and banana yield in Costa Rica. Turner D. y Rosales, F. (eds). *Banana root system: toward a better understanding for its productive management*. Proceedings. Inibap, Musalac, Corbana, San José de Costa Rica, 260 p.
31. Shew, H.D.; Fichtner, E.J. y Benson, D.M. 2007. Aluminum and plant disease, p. 247-264. Datnoff, L. E.; Elmer, W.H. Huber, D.M. *Mineral nutrition and plant disease*, Minesota: The American Phytopathological Society, 278 p.
32. Troeh, F. y Thompson, L. 2005. *Soils and soil fertility*. Blackwell Publishing, Iowa, 152 p.
33. Vaquero, R. 2003. Soil physical properties and banana root growth, pp. 125-131. Turner D. y Rosales, F. (eds). *Banana root system: toward a better understanding for its productive management*. Proceedings. Inibap, Musalac, Corbana, San José de Costa Rica, 260 p.
34. Vargas, A.; Arias, F.; Serrano, E. y Arias, M. O. 2007. Toxicidad de boro en plantaciones de de banano (*Musa AAA*) en Costa Rica. En: *Agronomía Costarricense*. 31, No. 2, p 21-29.
35. Warkentin, B. P. 2008. Soil structure: a history from tith to habitat. *Advances in Agronomy*, 97:239-272.

36. Wu, Y.; Xie, K.; Zhang, Q.; Zhang, Y. Xie, Y.; Zhang, G.; Zhang, W. y Ritsema, C.J. 2003. Crop characteristics and their temporal change on the loess plateau of china. *Catena*, 54(1-2):71-16.
37. Yost, R. S. 2000. Plant tolerance of low soil pH, soil aluminum, and soil manganese. Silva, J. A. y Uchida R. Plant nutrient management in Hawaii's, approaches for tropical and subtropical agriculture. Hawaii: College of Tropical Agriculture and Human resources, University of Hawaii at Manoa. p. 113-115.