

**UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO**

**Colegio de Posgrados**

**Respuesta Espacial de la Productividad al Nivel Freático de la  
Finca El Paso en el Cultivo de Banano (musa acuminata), Basado  
en el Uso de Sistemas de Información Geográfica**

**Juan Gabriel Argel Román**

**Tesis de grado presentada como requisito Para la obtención del título de  
Maestría en Sistema de Información Geográfica**

**Quito, Septiembre 2012**

**Universidad San Francisco de Quito**

**Colegio de Postgrados**

**HOJA DE APROBACIÓN DE TESIS**

**Respuesta Espacial de la Productividad al Nivel Freático de la  
Finca El Paso en el Cultivo de Banano (musa acuminata), Basado  
en el Uso de Sistemas de Información Geográfica**

**Juan Gabriel Argel Román**

Richard Resl. MSc.,  
Director de Tesis  
Director del Programa de Maestría en  
Sistemas de Información Geográfica

---

Pablo Cabrera  
Miembro del Comité de Tesis

---

Stella de la Torre, PhD.,  
Decana del Colegio de  
Ciencias Biológicas y Ambientales

---

Víctor Viteri Breedy, PhD.,  
Decano del Colegio de Postgrados

---

### © Derechos de autor

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

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

Firma

-----

Nombre: JUAN GABRIEL ARGEL ROMAN

C.C. 10774022

Fecha: Quito, 10 diciembre 2012

## **Agradecimientos**

Entrego este logro a Dios y todas las personas que me acompañaron en este proceso en especial a mi familia la cual siempre me dio fuerzas en los momentos más críticos de esta etapa.

A C.I. Uniban S.A. y principalmente a la Gerencia de Agroindustria la cual nos brindó todo el apoyo para que este proceso se cumpliera a cabalidad, además a la finca El Paso por permitirnos realizar este trabajo tan importante para su proceso productivo.

A mis compañeros de estudio y trabajo que estuvieron empujando y fortaleciendo mis conocimientos en todo momento a través de sus opiniones y recomendaciones.

## Resumen

La planta de banano necesita desarrollarse bajo condiciones armónicas entre el sistema radical y el foliar, para producir un fruto económicamente rentable y de buena calidad. Es por ello, que el sistema radicular de la planta de banano constituye un factor determinante; por lo tanto la deficiencia o exceso de agua en los suelos bananeros es un factor muy importante en el normal desarrollo del cultivo. Excesos de agua con saturación del suelo por periodos prolongados provocan en la planta pérdidas irreparables en el sistema radical, que repercutirán en la fructificación de la planta, el desarrollo y llenado del fruto. La agricultura es una actividad considerablemente dependiente de una clima propicio para su adecuado desarrollo y por este motivo ocurren (en ocasiones) descensos sustanciales en la producción de bienes derivados de la agricultura. La actividad bananera no es la excepción. La zona del Urabá es una zona de baja altitud (entre 0 y 100 metros sobre el nivel del mar) donde prevalecen las altas precipitaciones (entre 2,500 y 3,500 mm/año) y donde la temperatura se mantiene en un rango entre 26 y 28 grados centígrados, como promedio. De la misma manera, a través de la región prevalece la alta humedad relativa (promedio) y sumado a esto, hay tanto muchos días con lluvia como muchas horas con alta humedad relativa durante el día. Los suelos en general tienen altos contenidos de arcilla y son relativamente profundos, aunque se hace necesario contar con sistemas de drenaje eficiente debido que a las altas precipitaciones que se reciben en la región afectan los niveles del agua en el suelo y la productividad.

Es por lo anteriormente expuesto que se hizo necesario encontrar herramientas de SIG que permitan analizar de forma rápida y precisa toda la información que

tenemos hasta el momento disponible en la finca para mejorar las condiciones de la planta de banano y que nos brinde su máximo potencial productivo.

Este trabajo articula adecuadamente el proceso de captura, organización y análisis espacio temporal de la información recolectada para toma de decisiones, donde, se analizó el comportamiento semanal del nivel freático, la precipitación y pesos de racimo, a través de equipos como pluviómetro, pozos freáticos y báscula electrónica. Esta información se recolectó durante las semanas 49 del 2010 a la 12 del 2012 e utilizó las herramientas del ArcGIS que ayudaron a identificar la problemática de los niveles freáticos que afectan principalmente la productividad de la finca; estas son la interpolación del Spatial Analyst en ArcGIS por ponderación inversa (IDW) de los datos recolectados en cada pozo freático generando los mapas de altimetría, isobatas e isohipsas, donde en los mapas de isobatas el nivel freático en las distintas semanas de estudio osciló entre 50 y 150 centímetros (entre moderadamente profundo y muy profundo); las zonas de la finca que más se ven afectadas están ubicadas en el oeste de forma superficial o profunda. Los mapas de isohipsas mostraron que los canales que están cortando las aguas son los drenajes secundarios trabajo que deberían hacer los drenajes terciarios.

En el año se presentan cuatro eventos críticos en la precipitación y el nivel freático que impactan directamente en la productividad del banano de forma espacio temporal, estos se marcan de forma trimestral (15,5 semanas); donde en el primer y tercer trimestre se reducen a un nivel medio bajo los pesos de racimos, y en el segundo y cuarto trimestre se aumenta a un nivel medio alto, además, el análisis de regresión hecho a la precipitación y nivel freático indican una fuerte

correlación positiva en la misma semana evaluada, así mismo el nivel freático y el peso de racimo presentan la mayor correlación a las 13 semanas.

También la herramienta de superposición ponderada del Spatial Analyst y haciendo procedimientos previos con las herramientas de conversión de polígonos a raster y reclasificación de valores, se pudo definir que las áreas más críticas de la finca que se deben intervenir a un corto plazo están ubicadas en los lotes 1, 3 y 32; a mediano y largo plazo los lotes 1 al 9 y 29 al 34.

## Abstract

Also the Spatial Analyst superposition weighted tool and doing previous procedures using the polygons conversion tools, a raster and values reclassification, it could be defined that the farm's more critical areas that must be intervened in short time are located in the lots 1, 3 and 32; medium and long times are the lots 1 to 9 and 29 to 34.

The banana plant needs to grow under harmonic conditions between the foliar and radical system, in order to produce fruit economically profitable and good quality. That is why the banana plant's root system constitute a determine factor; therefore, deficiency or excess of water in banana plantations is very important in the normal development of crops. The excess of water with soil saturation for long periods of time causes in the plant's root system irreparable losses, which would have repercussions in the plant fruiting, develop and fruit filling. Agriculture is an activity considerably dependent on a propitious climate in order to have an appropriate growth; this is why (in occasions) substantial descends in the production of goods derived of agriculture. The banana related activity is not the exception. The Uraba zone is a low altitude zone (0 to 100 meter above sea level) where high precipitations prevail (2,500 to 3,500 mm/year) and where temperature maintains a range between 26 - 28 Celsius grades, average. In the same way, along the region prevails high relative humidity (average) added to this, there are many rainy days as many high relative humidity hours along the day. Soils in general have high contents of clay and are relatively deep, even though, It is necessary to have accurate drainage due to high precipitations levels receive which affect soil's water levels and productivity.



Due to what was stated that became a necessity to find out SIG tools that allow analyze in a fast and accurate way all information gather in the farm so far, in order to improve the banana plants' conditions and to bring maximum productive potential.

This research accurately articulates the process of capture, organization and analysis of temporal space collected for decisions making, where, the weekly watertable level behavior was analyzed, precipitation and weights of clusters, through the use of equipments such as: gauge, watertable wells and electronic scale. This information was gathered during the weeks # 49 of 2010 to week # 12 of 2012 and ArcGis tools where used in order to help in the identification of the problematic in terms of high watertable levels affecting mainly the productivity in the farm; being these, The Spatial Analyst in ArcGIS' interpolation by inverse weight (IDW) of collected in each watertable well generating then, altimetry maps, isobaths and height contours, where in the isobaths maps the watertable levels in different weeks of study oscillated between 50 and 150 centimeters (between moderately deep and very deep); The farm's zone that are more affected are located in the west in a either superficial or deep form. The height contours maps showed that canals that are crossing waters are the secondary drainages, job that should be done by tertiary drainages.

Every year four critic events take place related to precipitation and watertable levels which directly impact banana's productivity in temporal space form, these are marked quarterly (15,5 weeks); where in the first and third quarterly the clusters' weight reduce to a medium low level, and in the second and fourth quarterly the weight rises to a medium high level, besides, the analysis of

regression done to precipitation and watertable levels indicate a strong positive correlation in the same evaluated week, as well as the watertable level and the clusters' weight show a higher correlation to the 13 weeks.

Also the Spatial Analyst superposition weighted tool and doing previous procedures using the polygons conversion tools, a raster and values reclassification, it could be defined that the farm's more critics areas that must be intervened in short time are located in the lots 1, 3 and 32; medium and long times are the lots 1 to 9 and 29 to 34.

## Tabla de Contenido

<b>Resumen</b> .....	vii
<b>Abstract</b> .....	x
Tabla de Contenido .....	xiii
<b>Lista de Tablas</b> .....	xv
<b>Lista de Figuras</b> .....	xv
<b>1. Introducción</b> .....	18
<b>1.1. Antecedentes</b> .....	18
<b>1.2. El problema</b> .....	19
<b>1.3. Justificación</b> .....	19
<b>1.4. Caso piloto finca El Paso</b> .....	21
<b>1.5. Objetivos</b> .....	22
<b>1.5.1. General</b> .....	22
<b>1.5.2. Específicos</b> .....	22
<b>2. Revisión de literatura y fundamentos teóricos</b> .....	24
<b>2.1. Aspectos Generales del Cultivo de Banano</b> .....	24
<b>2.2. Aspectos Fisiológicos Utilizados para Evaluar el Efecto de las Condiciones de Drenaje en Banano</b> .....	25
<b>2.2.1. Sistema Radical</b> .....	25
<b>2.2.2. Hijos y Yemas Laterales</b> .....	26
<b>2.2.3. Sistema Foliar</b> .....	27
<b>2.2.4. Pseudotallo</b> .....	27
<b>2.2.5. Inflorescencia y Desarrollo del Fruto</b> .....	28
<b>2.3. El Suelo</b> .....	29
<b>2.4. Drenaje Agrícola en Banano</b> .....	30
<b>2.5. Diseño Hidráulico de Drenajes</b> .....	33
<b>2.5.1. Estudio Hidrológico</b> .....	34
<b>2.5.2. Estudio de Campo</b> .....	35
<b>2.5.3. Estudio Topográfico</b> .....	35
<b>2.5.4. Estudio de las propiedades físicas del Suelo</b> .....	36
<b>2.5.5. Estudio del Nivel Freático</b> .....	36
<b>2.5.6. Pozos de observación o freaticométricos</b> .....	38

2.5.7.	Red de Observación.....	39
2.5.8.	Estudio de la Conductividad Hidráulica.....	40
2.5.9.	Espaciamiento entre Drenajes. ....	41
<b>2.6.</b>	<b>Aspectos de Producción Utilizados para Evaluar el Efecto de las Condiciones de Drenaje en Banano.</b> .....	<b>42</b>
2.6.1.	Peso de Racimo.....	42
<b>2.7.</b>	<b>Uso de los SIG en el Cultivo de Banano</b> .....	<b>43</b>
<b>2.8.</b>	<b>Geoprocesamiento</b> .....	<b>47</b>
2.8.1.	Herramientas del Geoprocesamiento.....	48
2.8.1.1.	Conversión de polígono a raster.....	48
2.8.1.2.	Interpolación IDW del Spatial Analyst.....	49
2.8.1.3.	Reclasificación por rango de valores .....	53
2.8.1.4.	Superposición ponderada.....	54
<b>3.</b>	<b>Metodología</b> .....	<b>56</b>
3.1.	Conceptualización .....	56
3.2.	Captura de Datos .....	57
3.3.	Recolección e Ingreso de datos .....	57
3.4.	Indicadores y variables .....	59
<b>4.</b>	<b>Resultados</b> .....	<b>61</b>
4.1.	Datos de entrada.....	61
4.1.1.	Datos de precipitación (pluviómetro).....	62
4.1.2.	Datos de profundidad nivel freático (pozos freáticos) .....	63
4.1.3.	Datos de peso racimo (bascula electrónica).....	63
4.2.	Metodología aplicada y resultados principales.....	65
4.2.1.	Organización de datos de entrada y observaciones generales....	65
4.3.	Metodología aplicada y resultados principales (método gráfico) .....	73
4.3.1.	<i>Interpolación de superficies usando Spatial Analyst (ArcGIS)</i> .....	73
4.3.2.	Mapeo de zonas aptas para el cultivo bajo la herramienta de superposición .....	84
<b>5.</b>	<b>Conclusiones</b> .....	<b>90</b>

<b>6. Recomendaciones</b> .....	92
<b>7. Bibliografía</b> .....	93
<b>8. Glosario</b> .....	96
<b>9. Anexos / apéndices</b> .....	98

## Lista de Tablas

	<b>Pág.</b>
Tabla 1. Unidades de medición, periodicidad y de medida espacial para los componentes evaluados.....	57
Tabla 2. Clasificación de rangos establecidos para el cultivo de banano a nivel de la zona de Urabá Colombia, para la profundidad del nivel freático, peso de racimo y aptitud para producción de banano.....	64
Tabla 3. Cuantificación de las áreas de acuerdo a los rangos establecidos para el nivel freático y peso de racimo, en las semanas analizadas.....	79
Tabla 4. Cuantificación de las áreas de acuerdo a los rangos establecidos para el nivel freático y peso de racimo, en las semanas analizadas, y asignación de los valores establecidos para cada variable teniendo en cuenta una igualdad de porcentajes.....	86
Tabla 5. Cuantificación de las áreas de acuerdo a los rangos establecidos para la aptitud de producción de banano.....	89

## Lista de Figuras

	<b>Pág.</b>
Figura 1. Distribución de lotes dentro de la finca sobre la capa del comportamiento del nivel freático en el suelo en una finca de cacao en Ecuador.....	45
Figura 2. Esquema simplificado de la aplicación de los SIG en fincas bananeras.....	46
Figura 3. Equipos para la toma de datos en campo, donde, de izquierda a derecha se tiene pluviómetro, pozo freaticométrico, báscula peso racimo y	

GPS.....	60
Figura 4. Cartografía de la finca donde se ubican los lotes, ríos - caños, pozos freaticométrico, pluviómetro y empacadora (construcción) donde se toman los pesos de racimos.....	61
Figura 5. Comportamiento histórico de la precipitación y profundidad del nivel freático promedio de la finca El Paso entre las semanas 49 de 2010 y 12 de 2012.....	62
Figura 6. Comportamiento de la profundidad del nivel freático y peso de racimo de la finca El Paso entre las semanas 49 de 2010 y 12 de 2011.....	63
Figura 7. Comportamiento de la precipitación y peso de racimo de la finca El Paso entre las semanas 49 de 2010 y 12 de 2011.....	64
Figura 8. Comportamiento del nivel freático diario, en la semana 1 del 2011 de acuerdo a la precipitación acumulada en las semanas 49 a la 52 del 2010 y 1 del 2011.....	66
Figura 9. Comportamiento del nivel freático detallado día a día en las semanas 9, 21, 38 y 39 del 2011, donde sus lecturas fueron incoherentes al llevarlas a un nivel semanal.....	67
Figura 10. Diagrama de dispersión y regresión entre las variables de nivel freático (dependiente) y precipitación (independiente).....	68
Figura 11. Grafica de dispersión de la profundidad del nivel freático en cada pozo de observación de las semanas 01 del 2011 a la 12 del 2012.....	69
Figura 12. Diagrama de dispersión y regresión entre las variables de peso (dependiente) y precipitación (independiente) en las mismas semanas evaluadas.....	69
Figura 13. Diagrama de dispersión y regresión entre las variables de peso (dependiente) y precipitación (independiente) 16 semanas después del evento del nivel freático.....	70
Figura 14. Diagrama de dispersión y regresión entre las variables de peso (dependiente) y nivel freático (independiente) en las mismas semanas	

evaluadas.....	71
Figura 15. Diagrama de dispersión y regresión entre las variables de peso (dependiente) y nivel freático (independiente) 13 semanas después del evento del nivel freático.....	71
Figura 16. Grafica de dispersión del peso de racimo de la semana 01 del 2011 a la 12 del 2012 por lote.....	72
Figura 17. Curvas de nivel que reflejan la altimetría que tiene la finca teniendo en cuenta la altura de los pozos freáticos sobre el nivel del mar (msnm).....	74
Figura 18. Graficas de precipitación cuatro semanas atrás de las semanas seleccionadas para hacer los análisis isobatas en cada trimestre del año.....	77
Figura 19. Mapas isobatas de nivel freático (izquierda) y peso de racimo por lote (derecha) finca El Paso, en semanas donde se presentan los eventos más representativos del estudio.....	81
Figura 20. Mapas de Isohipsas que reflejan el comportamiento de las aguas subterráneas en la finca El Paso, en épocas donde son más representativos los cambios del nivel freático (semanas 1, 21, 34 y 44 del 2011).....	83
Figura 21. Mapa de Isohipsas promedio de todas las semanas evaluadas que reflejan el comportamiento de las aguas subterráneas vs el diseño de drenajes de la finca El Paso.....	84
Figura 22. Mapa aptitud de áreas por superposición de isobatas y pesos de racimos en cada trimestre del año y el promedio de todas las semanas evaluadas.....	87

## **1. Introducción**

### **1.1. Antecedentes**

Según Soto (1994) La planta de banano necesita desarrollarse bajo condiciones armónicas entre el sistema radical y el foliar, para producir un fruto económicamente rentable y de buena calidad. Es por ello, que el sistema radicular de la planta de banano constituye un factor determinante; por lo tanto la deficiencia o exceso de agua en los suelos bananeros es un factor muy importante en el normal desarrollo del cultivo. Excesos de agua con saturación del suelo por periodos de más de tres días provocan en la planta pérdidas irreparables en el sistema radical, que repercutirán en la fructificación de la planta y el desarrollo y llenado del fruto.

Según López (1999) una de las mayores limitantes en el crecimiento del banano lo constituye las condiciones de drenaje superficial y especialmente la profundidad del nivel freático. Se ha determinado que manteniendo el nivel freático a una profundidad de 120 cm. se pueden tener condiciones favorables para el desarrollo del cultivo.

Por otra parte Sancho (1993) afirma que conforme aumenta la profundidad del nivel freático la distribución radicular mejora. Esto beneficia a las condiciones de aireación estimulándose el crecimiento y desarrollo de raíces. Las raíces en condiciones de buena aireación son más largas y de mayor diámetro que las raíces producidas bajo malas condiciones de aireación.



## **1.2. El problema**

La agricultura es una actividad considerablemente dependiente de un clima propicio para su adecuado desarrollo y por este motivo (sumado a la dificultad para predecir cualquier fenómeno climático), ocurren (en ocasiones) descensos sustanciales en la producción de bienes derivados de la agricultura. La actividad bananera no es la excepción. La zona del Urabá es una zona de baja altitud (entre 0 y 100 metros sobre el nivel del mar) donde prevalecen las altas precipitaciones (entre 2,500 y 3,500 mm/año) y donde la temperatura se mantiene en un rango entre 26 y 28 grados centígrados, como promedio. De la misma manera, a través de la región prevalece la alta humedad relativa (promedio) y sumado a esto, hay tanto muchos días con lluvia como muchas horas con alta humedad relativa durante el día. Los suelos en general tienen altos contenidos de arcilla y son relativamente profundos, aunque se hace necesario contar con sistemas de drenaje eficiente debido a las altas precipitaciones que se reciben en la región (Ramírez, et al 2010).

En la zona de Urabá se encontró que el nivel freático en la mayor parte de la región oscila entre 50 y 150 centímetros, aunque la mayor parte del área se mantiene por debajo de los 100 cm (Ramírez, et al 2010).

## **1.3. Justificación**

Para Pizarro (1985), citado por Soto (1994): Un suelo mal drenado produce en el cultivo la reducción o eliminación del espacio con aire del suelo, evitando de esta manera la entrada de oxígeno atmosférico hacia las raíces, indispensable para sus funciones de respiración y crecimiento. Bajo tales circunstancias se limita el intercambio gaseoso en el suelo al no permitir la salida del dióxido de

carbono (CO<sub>2</sub>), con lo cual el sistema radical de las plantas puede morir por asfixia produciéndose la pérdida del cultivo. Asimismo, las plantaciones establecidas en terrenos con mal drenaje no pueden hacer uso eficiente de los fertilizantes, ya que la energía derivada de la respiración dentro de la raíz es utilizada parcialmente en el proceso de absorción de nutrientes, y en estas condiciones dicha energía es mínima. Este autor expresa que: Los factores que influyen en el nivel freático son:

- La precipitación y otras fuentes de recarga,
- La evaporación y las descargas de otro tipo,
- Las propiedades del suelo,
- La profundidad y espaciamiento de los drenes,
- La superficie de la sección de los drenes,
- Aporte o salida de agua subterránea,
- El nivel del agua en los drenes y
- Perdidas por lixiviación.

Valverde (1998), sostiene que la profundidad del nivel freático en el perfil permite conocer el grado de severidad del problema de drenaje, pues es ahí donde se desarrollan las raíces.

Es por lo anteriormente expuesto que se hace necesario encontrar herramientas de SIG que permitan analizar de forma rápida y precisa toda la información que tenemos hasta el momento disponible en la finca para mejorar las condiciones de la planta de banano para que nos brinde su máximo potencial productivo.

#### **1.4. Caso piloto finca El Paso**

En el presente trabajo, se analizó el comportamiento semanal del nivel freático, la precipitación y pesos de racimo con base a medidas tomadas en campo, a través de equipos como pluviómetro, pozos freáticos y báscula electrónica. Esta información se recolectó durante las semanas 49 del 2010 a la 12 del 2012 e utilizó la herramienta de interpolación del Spatial Analyst en ArcGIS por ponderación inversa (IDW) y bajo los criterios descritos en la metodología genera adecuadamente los mapas de altimetría, isobatas e isohipsas, necesarios para analizar la variabilidad espacio temporal de los datos recolectados en cada pozo freático ubicados en la finca.

En general se encontró que el nivel freático en las distintas semanas de estudio osciló entre 50 y 150 centímetros (entre moderadamente profundo y muy profundo). El análisis de regresión hecho a la precipitación y nivel freático indican una fuerte correlación positiva en la misma semana evaluada, así mismo el nivel freático y el peso de racimo presentan la mayor correlación a las 13 semanas.

La finca El Paso presenta una pendiente natural (superficie) que va desde el este hacia el oeste, coincidiendo con la macro geografía de la región. Esta misma tendencia presentan las aguas freáticas como se observan en los mapas de isohipsas mostrando que los canales que están cortando las aguas son los drenajes secundarios trabajo que deberían hacer los drenajes terciarios.

En el año se presentan cuatro eventos críticos en la precipitación y el nivel freático que impactan directamente en la productividad del banano de forma

espacio temporal, estos se marcan de forma trimestral (15,5 semanas); donde en el primer y tercer trimestre se reducen a un nivel medio bajo los pesos de racimos, y en el segundo y cuarto trimestre se aumenta a un nivel medio alto.

De acuerdo a los mapas de isobatas (interpolaciones) las zonas de la finca que más se ven afectadas por los niveles freáticos están ubicadas en el oeste, esto ya sea en épocas donde el agua se encuentre de forma superficial o profunda.

Con el uso de la herramienta de superposición ponderada del Spatial Analyst se pudo definir que las áreas más críticas de la finca que se deben intervenir a un corto plazo están ubicadas en los lotes 1, 3 y 32; a mediano y largo plazo los lotes 1 al 9 y 29 al 34.

## **1.5. Objetivos**

### **1.5.1. General**

Determinar la repuesta del cultivo de banano a la variabilidad del nivel freático en la finca el Paso, mediante la relación espacial de indicadores de productividad (producción), precipitación y nivel freático.

### **1.5.2. Específicos**

- Realizar la conceptualización definiendo el modelo conceptual, lógico y físico mediante los componentes y variables evaluar.
- Definir espacialmente la ubicación de los pozos freáticos para la medición del nivel freático presente en la finca, además del pluviómetro.

- Definir espacialmente las unidades de productividad mínima, de acuerdo al manejo administrativo de la finca para la toma de datos de productividad.
- Recolectar la información pertinente para almacenar y alimentar la base de datos de manera frecuente.
- Desarrollar operaciones de análisis planteadas en el modelo conceptual bajo las herramientas más adecuada, para obtener información precisa de interpretación y generación de resultados.
- Establecer una metodología adecuada bajo las herramientas del ArcGIS que ayude a la toma de decisiones de forma asertiva.

## **2. Revisión de literatura y fundamentos teóricos**

### **2.1. Aspectos Generales del Cultivo de Banano.**

Según Soto (1994) La planta de banano necesita desarrollarse bajo condiciones armónicas entre el sistema radical y el foliar, para producir un fruto económicamente rentable y de buena calidad. Es por ello, que el sistema radicular de la planta de banano constituye un factor determinante; por lo tanto la deficiencia o exceso de agua en los suelos bananeros es un factor muy importante en el normal desarrollo del cultivo. Excesos de agua con saturación del suelo por periodos de más de tres días provocan en la planta pérdidas irreparables en el sistema radical, que repercutirán en la fructificación de la planta y el desarrollo y llenado del fruto.

Según López (1999) una de las mayores limitantes en el crecimiento del banano lo constituye las condiciones de drenaje superficial y especialmente la profundidad del nivel freático. Se ha determinado que manteniendo el nivel freático a una profundidad de 120 cm. se pueden tener condiciones favorables para el desarrollo del cultivo.

Por otra parte Sancho (1993) afirma que conforme aumenta la profundidad del nivel freático la distribución radicular mejora. Esto beneficia a las condiciones de aireación estimulándose el crecimiento y desarrollo de raíces. Las raíces en condiciones de buena aireación son más largas y de mayor diámetro que las raíces producidas bajo malas condiciones de aireación.

CORBANA (1985) citado por Pérez (1999) señala que la construcción del sistema de drenaje en suelos de textura pesada tiene un efecto sobre el vigor, precocidad y producción de la nueva plantación. Una de las razones es la disminución de la

densidad aparente del suelo a consecuencia del movimiento de tierra en dicha labor, efecto que favorece el crecimiento radical y su capacidad de exploración. Por otro lado, la renovación se realiza con el fin de prevenir el deterioro de la raíz y conservar el arreglo espacial en el tiempo. Al unir estas labores, se pretende prevenir el deterioro de la raíz, y mantener el vigor y potencial máximo de producción a través de la competencia equilibrada.

## **2.2. Aspectos Fisiológicos Utilizados para Evaluar el Efecto de las Condiciones de Drenaje en Banano.**

### **2.2.1. Sistema Radical.**

De acuerdo con Soto (1992) el origen de las raíces es endógeno, ya que se origina en el cilindro central del cormo. Estas se producen al excitarse los puntos de crecimiento jóvenes que en vez de producir brotes producen grupos de raíces, cuando estos puntos de crecimiento se agotan por destrucción, se excitan las yemas superiores más nuevas haciendo que el cormo en su parte inferior se envejezca y deje de ser activo. Esto puede explicar el crecimiento de raíces superficiales ante condiciones de estrés, cuando mueren raíces se emiten nuevos brotes con nuevos sistemas de raíces secundarios, lo que desfavorece una buena distribución del sistema radical de la planta.

Durante los primeros meses de crecimiento vegetativo, la producción de raíces es abundante. El porcentaje funcional es de 25 a 50 % (Champion y Olivier 1961). Las raíces son de crecimiento rápido y muy sensibles al déficit o exceso hídrico, ya que el 65 % de ellas se encuentra en los primeros 30 centímetros del suelo (Soto 1992).

Champion (1961) menciona que desde el momento en que aparece la floración, la formación de raíces disminuye aunque aparentemente continúan formándose las que ya se habían preformado cerca de la iniciación floral.

De acuerdo a Stover y Simmonds (1987) el crecimiento radicular y su distribución están muy ligados a las condiciones de drenaje y que los mismos se ven afectados severamente cuando se presenta el nivel freático a menos de un metro de profundidad. Estas condiciones tienen una relación directa con el contenido de raíces y los índices de cosecha utilizados para evaluar la productividad del cultivo.

### 2.2.2. Hijos y Yemas Laterales.

De acuerdo con Soto (1992) el desarrollo del retoño puede sintetizarse en tres fases:

- *Fase infantil*: esta fase comprende desde la aparición de la yema lateral hasta la independencia de la planta madre.
- *Fase juvenil*: es el intervalo entre la independencia del hijo con respecto a la planta madre, que es cuando se da la emisión de la primera hoja que posee las dimensiones de una hoja propia del clon (Fm) hasta la diferenciación floral (DF).
- *Fase reproductiva*: esta fase comprende desde el inicio de la diferenciación floral hasta la cosecha del fruto.

Lassoudière (1980) afirma que es necesario un intervalo largo entre la aparición de la hoja "F10" (primera hoja emergida cuyo ancho es de aproximadamente 10 cm.) y la hoja "Fm" para obtener una fruta grande. En este período debe emitirse de 8 a 9 hojas. Si es corto (4 a 5 hojas) el racimo será pequeño, porque la planta no tendrá suficientes reservas nutricionales para una buena diferenciación floral y



desarrollo del fruto al independizarse de la planta madre. Es por ello que la actividad vegetativa del "hijo" se correlaciona con el desarrollo de la planta madre.

### **2.2.3. Sistema Foliar.**

Soto (1992) menciona que uno de los fundamentos principales para el estudio de las condiciones foliares para el banano es el número de hojas emitidas hasta la época de floración.

Según Lassoudière (1980) en el sistema foliar del banano las siete hojas más nuevas son las que reciben mayor luz solar a consecuencia de su posición superior en el espacio foliar; estas hojas serán las más activas y llevarán a la planta hasta el final de su período fisiológico. En cada lámina foliar, los tercios inferiores de la hoja son más activos que los tercios medios y superiores (Soto 1992).

Una planta de banano emite generalmente de 25 a 35 hojas (Soto 1992). La frecuencia de emisión bajo condiciones favorables es de una hoja por cada 7 a 10 días. En caso de déficit hídrico o cambios bruscos de temperatura la frecuencia de emisión foliar puede ser de una hoja por mes o más. La emisión de una hoja por semana es un buen índice de producción (Simmonds 1973).

### **2.2.4. Pseudotallo.**

De acuerdo a Simmonds (1973) el pseudotallo ofrece a la planta apoyo y la capacidad de almacenar reservas amiláceas e hídricas. También afirma que el aumento de volumen en el pseudotallo se debe al desarrollo de nuevas hojas en su interior. Por otra parte, el pseudotallo permite a la planta alcanzar mayor altura y elevar el nivel de las láminas foliares que captan la luz solar, además que su

estructura resistente permite soportar el peso de las láminas foliares y de su inflorescencia.

De acuerdo a Soto (1992), la velocidad de crecimiento del pseudotallo del retoño en el período Floración-Cosecha de la planta madre es muy importante. Un crecimiento sustancial en altura, da como resultado una inflorescencia grande. Cuando se presentan inflorescencias pequeñas, por lo general se puede atribuir a un desequilibrio entre la altura y el número de hojas emitidas en un tiempo dado, observándose además que en esta condición las plantas presentan entrenudos falsos más cortos, dando una apariencia arrepollada.

#### **2.2.5. Inflorescencia y Desarrollo del Fruto.**

El ciclo de la inflorescencia según Lassoudière (1980) comprende desde la iniciación floral hasta la emisión de la inflorescencia, período con una duración aproximada de 20 días. El raquis puede llegar a alcanzar su tamaño definitivo en 50 días después de la iniciación floral, es decir, un mes después de la floración.

El mejor momento para que se lleve a cabo la diferenciación floral en el hijo es de los 5 a 40 días después de la cosecha de la planta madre, a fin de que no exista antagonismo por nutrición entre la planta madre, su fruto y la inflorescencia en desarrollo (Soto 1992).

Simmonds (1973) dice que uno de los criterios utilizados para determinar el punto de corte de los racimos es el grado del dedo o calibre, que corresponde al diámetro del fruto, este generalmente se mide en la segunda mano apical del racimo y está expresado en 32avos de pulgada.

El racimo es cosechado de 90 a 120 días después de la salida de la inflorescencia, cuando los frutos alcanzan un grado determinado y a un estado cercano a la maduración (Stover y Simmonds 1987).

Es importante mencionar la interrelación que guarda el peso de racimo con la circunferencia de pseudotallo. Soto (1992) menciona estudios efectuados con el clon "Valery" en la República de Guinea, en los que se revela la existencia de una correlación lineal entre el peso del racimo y la circunferencia del pseudotallo medida a un metro del suelo y al tiempo de floración. El coeficiente de regresión fue casi independiente de la fertilidad del suelo, densidad de la plantación y el tipo de material vegetativo usado.

### **2.3. El Suelo.**

Según Soto, M. (1994), el sistema suelo consiste de partículas sólidas de diferentes tamaños, las cuales se han clasificado de acuerdo a sus diámetros equivalentes en: arena, limo y arcilla. Estas fracciones tienen diámetros equivalentes en los rangos de 2.0 a 0.02, 0.02 a 0.002 y menores que 0.002 mm respectivamente. La proporción de estas tres fracciones, determinan la textura del suelo.

La finalidad que persigue el drenaje es mantener las condiciones adecuadas de aireación y actividad biológica en el suelo, para que se dé el desarrollo normal de las raíces de los cultivos. También el drenaje permite la eliminación de sales de suelo y el mantenimiento de un balance salino adecuado para los cultivos (Valverde, 1998).

Para Pizarro (1985), citado por Soto (1994): Un suelo mal drenado produce en el cultivo la reducción o eliminación del espacio con aire del suelo, evitando de esta

manera la entrada de oxígeno atmosférico hacia las raíces, indispensable para sus funciones de respiración y crecimiento. Bajo tales circunstancias se limita el intercambio gaseoso en el suelo al no permitir la salida del dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), con lo cual el sistema radical de las plantas puede morir por asfixia produciéndose la pérdida del cultivo. Asimismo, las plantaciones establecidas en terrenos con mal drenaje no pueden hacer uso eficiente de los fertilizantes, ya que la energía derivada de la respiración dentro de la raíz es utilizada parcialmente en el proceso de absorción de nutrientes, y en estas condiciones dicha energía es mínima. Este autor expresa que: Los factores que influyen en el nivel freático son:

- La precipitación y otras fuentes de recarga,
- La evaporación y las descargas de otro tipo,
- Las propiedades del suelo,
- La profundidad y espaciamiento de los drenes,
- La superficie de la sección de los drenes,
- Aporte o salida de agua subterránea,
- El nivel del agua en los drenes y
- Perdidas por lixiviación.

#### **2.4. Drenaje Agrícola en Banano.**

Colina, S. De la. (1997) expresa que, el drenaje de tierras agrícolas tiene como objeto eliminar los sobrantes de agua del suelo, con el fin de mantener las condiciones necesarias de aireación y actividad biológica del mismo, para que las plantas puedan desarrollar los procesos de crecimiento de su sistema radical y, por ende, de su parte aérea.

Sierra (1994) indica que: cuando el nivel de la tabla de agua es alto su efecto es notorio sobre el aspecto de la plantación, la cual presenta un color amarillento, poco vigor del pseudotallo, y arropollamiento en la aparición de las hojas. El tamaño de los racimos se reduce considerablemente.

Sierra (1994) indica que: en un sistema de drenaje se puede distinguir:

- Drenaje primario, cuya función es de transportar el agua fuera de la zona a drenar (Predio).
- Drenaje secundario, cuya función es la de recoger el agua de los drenes de parcela y transportarla al drenaje primario (colector).
- Drenaje terciarios o de parcela, que son aquellos cuya misión es de controlar la profundidad del agua freática

Soto (2008) sostiene que: Parte del agua de riego o de lluvia que se infiltra en el suelo quedará almacenada en los poros y será utilizada por los cultivos y otra parte, se perderá por percolación profunda originando la elevación del nivel freático. Cuando el nivel freático alcanza la zona radicular, las plantas pueden sufrir daños debido al anegamiento. Para eliminar el agua en exceso de la zona radicular y las sales disueltas en la solución del suelo se utiliza el drenaje subsuperficial, que permite el flujo de agua freática hacia los drenes.

Para Soto (1994): No siempre hay una distinción clara de las funciones de los drenes; por ejemplo, todos los drenes primarios y secundarios tienen una misión de transporte, y, todos los drenes primarios y el principal controlan también en parte la profundidad del agua freática.

Para Aidárov, et al (1984) El drenaje con una profundidad de 3 a 4 metros está diseñado para la evacuación de excesos de agua freáticas subsuperficiales (hasta

una profundidad de 2 a 3 metros desde el nivel del suelo) y aguas subterráneas, provenientes de acuíferos subterráneos.

Para el ILRI (1978): “El reconocimiento de campo constituye una herramienta básica para realizar la planificación del trabajo posterior. En esta etapa se debe llegar a esclarecer los siguientes aspectos:

- Localización y capacidad de los drenajes naturales.
- Localización y condiciones de las salidas.
- Prácticas de riego empleadas (sistemas de riego, eficiencia, etc.)
- Determinación del nivel freático actual e información relacionada con su fluctuación.
- Cultivo actual y tendencia futura.
- Tipo, espaciamiento, localización, profundidad y efectividad de los drenes en el área problema y/o en áreas vecinas.
- Marcas de alturas de crecidas que puedan ser usadas para evaluar su probable efecto.
- Salinidad del suelo de la finca, del agua de riego, o de la zona en estudio.”

El ILRI en Teorías del drenaje agrícola y de la esorrentía (1978) indica que, “la elección apropiada del criterio de drenaje dependerá del conjunto de condiciones siguiente”:

- *Hidrológicas*, que determinan la cantidad de agua que ha de drenarse en un tiempo determinado.
- *Agronómicas*, que dependientes de los cultivos y condiciones específicas del suelo, determinan el límite superior permisible del contenido de humedad del suelo en la zona radicular y su duración.

- *Edáficas*, que determinan las relaciones: entre aireación y contenido de humedad del suelo, nivel freático y ascensión capilar.
- *Económicas*, que determinan las relaciones costo-beneficio, es decir, la relación entre costos de realizar obras de drenaje y los beneficios que se derivan al ser menos frecuentes y severas las mermas en los rendimientos.

## **2.5. Diseño Hidráulico de Drenajes.**

En el diseño de un sistema de drenaje deben considerarse factores edafológicos tales como: la topografía, textura y estructura de suelos, porosidad total y efectiva (macroporosidad), capacidad de retención de agua (microporosidad), y en especial la permeabilidad de los diferentes estratos que permitirá determinar la presencia de capas impermeables o poco permeables que influirán en forma decidida en la altura del nivel freático dentro del perfil. Para un diseño apropiado es necesario hacer una serie de estudios, que permitan tomar las decisiones adecuadas: (Soto, 2008)

Como información general, se requieren planos de la finca que aporten datos relacionados con el área ocupada, su parcelación, distribución de la red de drenajes existentes, topografía; estudios anteriores relacionados al suelo de la zona que permitan establecer datos geohidrológicos valiosos para el análisis del problema; registros de las observaciones de aguas subterráneas; ubicación de la finca; localizar los puntos donde se presentan excesos de agua, indicar las causas de tales excesos; cultivo; tiempo de drenaje; lapso de inundación que el cultivo tolera sin reducir su producción; e historial de la finca en cuanto a riego y drenaje. (Soto, 2008)

### 2.5.1. Estudio Hidrológico

El análisis de los datos hidrológicos permite establecer la frecuencia, duración y severidad de las precipitaciones y sus efectos provocan en última instancia problemas de drenaje.

La cantidad de precipitación que cae sobre el terreno en un cierto período se expresa como una altura (mm) que cubriría un plano horizontal sobre el suelo. La altura de la precipitación puede ser considerada como variable estadística, cuyo valor depende de estación del año, duración elegida y área en estudio (ILRI, 1978).

Se requieren de los estudios hidrológicos para determinar las lluvias críticas, que producen un incremento máximo en la elevación del nivel freático. Dado que la precipitación es altamente variable en el tiempo y en el espacio, se debe contar con un número suficiente de datos y preferiblemente de varias estaciones meteorológicas, para lograr un buen grado de probabilidad en los estimados de los elementos críticos. Lo que se desea en última instancia, es la lluvia crítica que produce la descarga máxima (Belalcázar, 1991).

Para ILRI (1978) precipitación efectiva es “toda aquella precipitación que con el tiempo termina convirtiéndose en escorrentía”. El mismo autor indica que: La lluvia de diseño depende del tiempo de drenaje (que determina la duración de la lluvia de diseño) y el período de retorno deseado (El Servicio de Conservación de Suelos, USA, recomienda períodos de retorno de 10 años en condiciones típicas del trópico).

Anderson (1966) citado por el autor anterior advierte que “A menos que el resultado este basado en datos precisos y completos, tales conclusiones están condenadas a ser absurdas”



Grassi (1991) manifiesta que la precipitación de diseño depende de dos factores principales: El tiempo de drenaje y el periodo de retorno deseado. El tiempo de drenaje determina la duración de la lluvia de diseño.

Linsley, et al (1977) indican que es evidente la relación entre la precipitación y la escorrentía. La cantidad de escorrentía a partir de una lluvia depende de las condiciones de humedad del suelo al comienzo de la lluvia y de las características de la lluvia tales como: Cantidad de precipitación, intensidad y duración.

Linsley y Franzini (1967) indican que Gumbel sugirió que una distribución de valores extremos era más apropiada para los análisis de datos hidrológicos, que los valores promedio.

#### **2.5.2. Estudio de Campo**

Los estudios de campo incluyen el estudio topográfico: plano con curvas de nivel y área de la finca; propiedades físicas del suelo, nivel freático, infiltración, conductividad hidráulica y calidad del agua (Belalcázar, 1991).

#### **2.5.3. Estudio Topográfico**

Valverde (1998), menciona que es uno de los elementos fundamentales que se utilizan para diseñar la red de drenajes y obras complementarias; además permite conocer la zona para diseñar la red y ubicar sitios de importancia que faciliten el drenaje natural. Por medio de este estudio se deben fijar los cauces existentes, alturas, depresiones, cambios de pendiente que influyen en el flujo y la velocidad del agua.

#### **2.5.4. Estudio de las propiedades físicas del Suelo**

La textura, densidad aparente, porosidad y macroporosidad son factores fundamentales en el suelo y diseño de los drenajes. Para el análisis del perfil del suelo: en los estudios de drenaje es básico construir calicatas que permitan analizar las variaciones de nivel freático y los cambios de textura en la profundidad del perfil, sobre todo localizar estratos arcillosos de baja permeabilidad y la profundidad de la barrera impermeable (Belalcázar, 1991).

Para el autor antes mencionado, el drenaje sólo aumenta la velocidad de salida del agua gravitacional, de allí en adelante opera la evapotranspiración. Por esta razón, en el estudio de las propiedades del suelo se deben incluir las curvas de retención de humedad.

#### **2.5.5. Estudio del Nivel Freático**

Es importante conocer si los niveles freáticos provienen de mantos estabilizados (cuando la capa freática se encuentra sometida a la presión atmosférica y se desarrolla sobre la barrera impermeable) o confinados; en caso que provenga de mantos estabilizados es suficiente la apertura de una serie de pozos de observación; y si el manto es confinado, es decir que está sujeto a presión, se instala una red de piezómetros a diferentes profundidades para conocer el movimiento piezométrico. Este estudio es uno de los que aporta más elementos de juicio a la solución de un problema específico de drenaje. El estudio consiste en la instalación organizada de una serie de pozos de observación del nivel freático. La distribución de estos pozos debe ser de forma en que se pueda analizar el sentido del flujo del nivel freático. Normalmente se instalan en cuadrícula y paralelos al drenaje natural de la zona (Belalcázar, 1991).

La forma práctica de verificar si un cultivo necesita o no drenaje, es mediante la construcción de un pozo de observación en medio del cultivo, examinando la profundidad del nivel freático y midiendo la velocidad de descenso, posterior a un aguacero que sature al suelo (Belalcázar 1991).

Según Valverde (1998), las consecuencias del problema de drenaje subsuperficial son la evaporación, que toma calor del suelo, disminuyendo la temperatura del mismo, lo que alarga el periodo de crecimiento; un nivel freático elevado limita severamente la penetración de las raíces; la estructura del suelo se ve seriamente afectada; las sales si están presentes en el suelo, tienden a concentrarse en la zona radicular, o en la superficie del suelo, tanto por elevación capilar del nivel freático como por la limitación del lavado de las mismas.

Van der Sluijs y De Gruijter (1985) determinaron que, en Holanda, el nivel freático muestra una fluctuación estacional con niveles altos en invierno y bajos en verano. Lo anterior se debe a que la precipitación está casi igualmente distribuida en el año y la evapotranspiración depende de la estación. En invierno hay un exceso de lluvia que causa altos niveles freáticos. En primavera, la evapotranspiración comienza a exceder a la precipitación y, junto con el drenaje natural del terreno, ocurre una caída en el nivel freático hasta finales del verano u otoño. Con la reducción de la evapotranspiración, el exceso de lluvia provoca que se eleve el nivel freático. Las diferencias anuales entre precipitación y evapotranspiración y su distribución a través del año causan diferencias anuales en las fluctuaciones del nivel.

Según Soto (1994) los parámetros básicos que se deben tomar en cuenta para el diseño de una red de drenajes son: profundidad de los drenes; espaciamiento entre drenes; dimensiones de las zanjas (diámetro de los tubos); los demás

parámetros de diseño son elementos locales, tales como: coeficiente de drenaje; conductividad hidráulica; tiempo máximo que se debe drenar en función del cultivo; microporosidad del suelo; y sentido de flujo del nivel freático.

Valverde (1998), sostiene que la profundidad del nivel freático en el perfil permite conocer el grado de severidad del problema de drenaje, pues es ahí donde se desarrollan las raíces.

#### **2.5.6. Pozos de observación o freaticimétricos**

Los piezómetros son tubos de diámetro de 25 hasta 75 mm, que se entierran a profundidades que en algunos casos pueden llegar hasta 10 m, en ellos la entrada de agua ocurre sólo a través del extremo inferior del tubo, midiendo la presión hidrostática del agua subterránea en ese lugar. Las lecturas se realizan por medio de una sonda eléctrica (Valverde, 1998).

Los pozos de observación registran las fluctuaciones del nivel freático, la medición periódica sirve para definir la necesidad de drenaje y establecer un diseño adecuado según las características del suelo. La cantidad de pozos está en función del tipo de suelo, se recomienda un pozo cada 2 - 4 hectáreas. Los pozos se ubican en el punto medio entre dos canales terciarios, así se registra la elevación crítica del nivel freático. (Soto 2008)

Para el autor anterior, las lecturas que se obtienen a través de los pozos sirven para la confección de hidrogramas que reflejan las fluctuaciones de la tabla de agua a lo largo de un determinado tiempo. Las mediciones deben efectuarse en forma periódica, la frecuencia depende del tipo de estudio que se esté realizando; en un estudio de reconocimiento, una frecuencia de una o dos veces al mes generalmente es suficiente. Para obtener una visión representativa de la posición

de la capa freática de la zona en estudio, todas las mediciones deben hacerse de lo posible en la misma fecha, por lo general se recomienda hacerlas tres veces por semana.

Para Wesseling (ILRI 1978), el nivel freático ideal, para que el cultivo de banano no sufra significativamente en su productividad, es de 1,2 metros de profundidad a la distancia media entre dos drenes a las 24 horas. (Ver anexo. Detalles de un pozo de observación o freaticométrico)

#### **2.5.7. Red de Observación**

La red de observación suministra información sobre la elevación y variación de la capa freática. Estos datos pueden ser utilizados para determinar la configuración de la capa freática, la dirección del movimiento del agua superficial, y el emplazamiento de las zonas de recarga y descarga. Al planificar una red de observación se debe hacer una distribución óptima de los puntos de observación a lo largo y perpendicular a las líneas de flujo del agua superficial; en los emplazamientos donde se esperen cambios en la pendiente de la capa de agua; en zonas donde es probable que sucedan cambios en la elevación de la capa de agua; en los márgenes de los ríos y de otros cursos abiertos de agua y a lo largo de líneas perpendiculares a ellos; para determinar la curvatura de la capa freática cerca de tales cursos de agua; y en zonas donde hallan capas freáticas superficiales o puedan esperarse en el futuro (Molina, 1993).

La densidad de los pozos de observación va a estar en relación directa con el nivel de estudio que se desea realizar, con las características topográficas, geológicas y la gravedad del problema. El ordenamiento en el campo debe ser

regular para poder obtener perfiles longitudinales y transversales, en sitios de fácil acceso (Valverde, 1998).

### **2.5.8. Estudio de la Conductividad Hidráulica**

Según Núñez (1992), citado por Soto (2008), la conductividad hidráulica es afectada por: la textura del suelo, tipos de poros; presencia de grietas; estructura del suelo; contenido de materia orgánica; presencia de capas de baja permeabilidad; horizontes de diferente textura y por lo tanto una fuerte anisotropía vertical.

La conductividad hidráulica puede determinarse en el campo mediante el método de agujero de barreno. Este método es utilizado en suelos saturados, especialmente aquellos donde el nivel freático se halla a poca profundidad. Consiste en construir un pozo hasta unos 50 a 60 cm por debajo del nivel freático con una profundidad dada y luego medir la recuperación en función del tiempo (Belalcázar, 1991).

Belalcázar (1991) indica que para realizar bien este método deben de tomarse en cuenta una serie de consideraciones, tales como:

- Elección del sitio de la prueba, los puntos elegidos deben ser representativos de un área determinada, la época apropiada es aquella en que se tenga la tabla de agua más cerca de la superficie.
- Profundidad de perforación, dependerá de la naturaleza, espesor y secuencia de los horizontes del suelo.
- Nivel de depresión, el nivel de agua en el pozo se deprimirá entre 20 y 40 cm, y medidas de velocidad de recuperación, pueden realizarse a

intervalos fijos de tiempo o a intervalos fijos de la elevación del nivel de agua. El tiempo de recuperación, dependerá del tipo de suelo

En todos los casos, se debe tener la precaución de completar las medidas antes que el 25 % del volumen de agua extraído del orificio haya sido reemplazado por el flujo aportado por el agua del suelo.

### **2.5.9. Espaciamiento entre Drenajes.**

Belalcázar (1991) manifiesta: el distanciamiento está condicionado por los factores físicos, climáticos y de fluctuación del nivel freático y tienen como función bajar la tabla de agua a niveles óptimos. El sistema de drenaje que baja la tabla de agua es el terciario y debe de construirse contra las líneas de flujo y vertical al sistema secundario, que sirve como “colector”.

Soto (2008) expresa que: las fórmulas para el cálculo del espaciamiento de los drenes se basan en los principios del flujo de agua subterránea, para el cálculo del espaciamiento se consideran las constantes hídricas de los suelos tales como: conductividad hidráulica de los diferentes estratos, profundidad de la capa impermeable, y el espacio poroso drenable; así como los requerimientos del cultivo para la profundidad de la nivel freático y la capacidad de descarga.

Valverde (1998), menciona que al diseñar un sistema de drenaje se parte del principio de que el dren provoca una baja en la carga hidráulica, que origina el movimiento de agua hacia él, formándose una curva, misma que es conocida como curva de abatimiento, cuya forma es una elipse.

Zúñiga citado por Soto (1994) manifiesta lo siguiente: Las ecuaciones para el cálculo del espaciamiento de los drenes terciarios han sido desarrolladas por varios autores, entre ellos: Hooghoudt, Donnan, Ernst, Glover-Dumm, entre otros.

Estas se basan en suposiciones necesarias para su simplificación, tales como la de Dupuit-Forchheimer que considera el nivel freático como el tramo de una elipse.

## **2.6. Aspectos de Producción Utilizados para Evaluar el Efecto de las Condiciones de Drenaje en Banano.**

La calidad del racimo es el resultado de las condiciones y tratamiento del fruto desde su emergencia hasta la planta de empaque. Los factores precosecha son el resultado del comportamiento de las variables climáticas y las prácticas culturales; dichos factores interactúan para influenciar en la calidad postcosecha del fruto (Hassan y Pantastico, 1990).

La determinación del estado óptimo de cosecha del racimo y el manejo adecuado durante el transporte y empaque, son prerrequisitos necesarios para obtener alta calidad, debido a que las malas prácticas pueden causar daños físicos o fisiológicos (Robinson 1996).

### **2.6.1. Peso de Racimo.**

Dadzie y Orchard (1997) afirman que la evaluación del peso de racimo y de las características de la fruta, como peso, longitud, circunferencia y volumen, representan importantes criterios de calidad para la selección postcosecha.

Robinson (1996) menciona que el resultado final del tamaño del racimo debe de ser representativo del cultivar. Sin embargo, existe una interacción con el ambiente que determina finalmente el tamaño alcanzado a la madurez. La variabilidad genética existente en tamaño de fruto entre racimos del mismo cultivar es otro factor que se debe considerar.



Sancho (1990) menciona que cuando el nivel freático del suelo sube, el peso de racimo disminuye y la velocidad de engrosamiento del fruto es más lenta. Por consecuencia, las malas condiciones de drenaje pueden requerir mayor tiempo para cosechar racimos de igual grado.

## **2.7. Uso de los SIG en el Cultivo de Banano**

La aplicación de los Sistema de Información Geográfica (SIG) en la agricultura es ilimitada, la versatilidad que cada vez ganan los paquetes de software sobre los cuales se desarrollan estos sistemas, hace que los mismos se popularicen más en las fincas productoras. Esto cobra mayor importancia en países tropicales, en donde la mayoría de productos se comercializa como materia prima, sin darle un valor agregado que mejore sus precios, lo que crea la necesidad de hacer uso de los SIG como herramienta dentro de la agricultura de precisión (Spaans y Leonidas 2004). Son muchos los estudios que se han hecho en la agricultura utilizando los SIG para el manejo, combinación e interpretación de los datos relacionados al tema.

Como ejemplo se puede mencionar el caso del SIG implementado en el cultivo de cacao en ECUADOR. En este caso se hizo énfasis en la importancia de hacer una precisa delimitación y determinación del área de cada lote dentro de la finca, como primer paso para llevar a cabo una mejora en el manejo de la plantación. Esto a la vez permitiría describir la distribución de los lotes dentro de la finca y geo-referenciar datos agronómicos y productivos (Espinosa et al, 2005).

Soto (2006) afirma que dicha delimitación no necesariamente tiene que estar constituida por estructuras físicas a nivel de campo, sino que, con los avances de la tecnología actual, es posible hacerlo con el uso de equipos con GPS

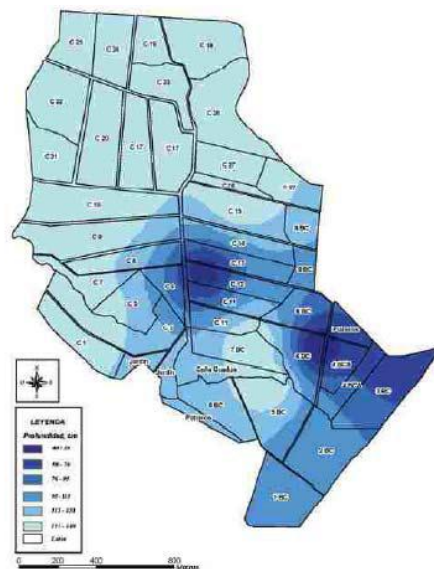
incorporado; además, afirma que la determinación del área deberá hacerse únicamente considerando lo que se denomina “área efectiva”, es decir, el área de cultivo sin incluir el terreno ocupado por edificios, caminos, drenajes, entre otros, porque de lo contrario se estaría sobre estimando el potencial productivo de la finca al momento de proyectarla cosecha.

La implementación del SIG en el cultivo de cacao al inicio representó una inversión considerable. Sin embargo, en el momento en que se implementó el SIG, el precio del cacao subió, lo que permitió llevar a cabo el proyecto y la inversión se hizo a sabiendas que dicho gasto retribuiría en el futuro con la toma de mejores decisiones fundamentadas en el conocimiento de la situación de la finca (Espinosa et al, 2005).

En esta finca de cacao, se hizo una clasificación de suelos, la cual no coincidía con la delimitación de los lotes que se había hecho años atrás; por esta razón, el estudio recalca la importancia de implementar los SIG especialmente en la etapa de diseño de cualquier finca dedicada a la actividad agrícola productiva, teniendo como fin hacer una mejor organización de la distribución de los lotes dentro de la finca. Adicionalmente, el estudio muestra el comportamiento de la tabla de agua en el terreno, pudiendo determinar los puntos de descarga y recarga, y la presencia de niveles críticos, facilitando el diseño de estructuras para drenar el suelo (Espinosa et al, 2005). La figura 1 muestra información geo-referenciada por medio del uso de un SIG, en donde se sobrepone la capa de la distribución de los lotes dentro de la finca de cacao y la capa del comportamiento del nivel freático en el suelo.

Para procesar eficientemente toda esta información, fue necesario el uso de un SIG, integrando los datos geo-referenciados sobre un plano, lo que permitió

implementar el manejo localizado de las áreas de cultivo y, a la vez, tener una visión clara de la situación general en la finca (Spaans y Leonidas 2004).

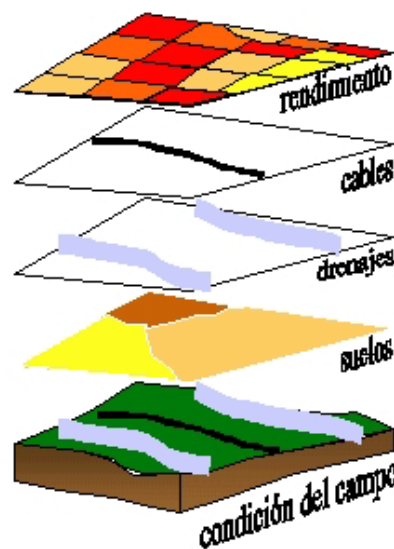


Fuente: Espinosa et al, 2005.

**Figura 1.** Distribución de lotes dentro de la finca sobre la capa del comportamiento del nivel freático en el suelo en una finca de cacao en Ecuador.

Con el uso del SIG se facilitó el monitoreo de la cosecha de caña en cada unidad de manejo y fue posible aplicar la fertilización acorde a las condiciones edáficas de cada unidad. También se generaron mapas temáticos sobre la rentabilidad y producción de manera localizada, los que al sobreponerse facilitaron un análisis detallado. El sistema permitió tomar decisiones correctas y precisas sobre lo que cada sección necesita, el momento y el lugar oportuno (Spaans y Leonidas 2004). En Costa Rica, CORBANA (2006) ha estado promoviendo e implementando el uso del SIG en el cultivo de banano para controlar la cosecha en forma georeferenciada dentro de las fincas, esto permite la identificación de lotes que presentan bajos rendimientos, con el fin de determinar las causas y poder mitigar el problema. Al igual, CORBANA ha estado usando el SIG para representar la distribución de los diferentes tipos de suelo en las fincas bananeras y para geo-

referenciar las mediciones de la profundidad del nivel freático obtenidas en diferentes puntos de las fincas, lo que permite el análisis de la efectividad de los sistemas de drenaje, pudiéndose identificar, por ejemplo, el momento en que se requiere dar mantenimiento a dichas estructuras. En la siguiente figura 2 se observa un esquema simplificado del SIG aplicado por CORBANA en las fincas bananeras, en el cual se muestran las diferentes capas que se pueden sobreponer.



FUENTE: CORBANA, 2006.

**Figura 2.** Esquema simplificado de la aplicación de los SIG en fincas bananeras.

CORBANA ha demostrado la funcionalidad de los SIG dentro de la actividad bananera; la cual se caracteriza por tener sistemas productivos donde existe abundancia de información, tal y como sucede en la Finca Comercial de Banano de la Universidad EARTH, donde constantemente se está generando información agronómica y productiva de los cuatro bloques que la constituyen.

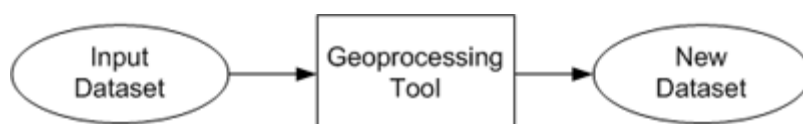
Dentro de la información existente se menciona el porcentaje de recuperación de cintas, chiras por hectárea, peso de racimos, cajas por hectárea por año, densidad de plantas por hectárea, indicadores de incidencia de Sigatoka (hoja más joven enferma, total de hojas a las 11 semanas, número de hojas a la

parición y número de hojas a la cosecha), incidencia de nemátodos (porcentaje de raíz funcional, cantidad de nemátodos en el suelo según su especie), características físicas y químicas del suelo (acidez extractable, pH en solución, textura, materia orgánica, densidad aparente del suelo, contenido de potasio, fósforo, calcio y magnesio entre otros elementos en el suelo) y contenido de nutrientes a nivel foliar (nitrógeno, fósforo, potasio, calcio y magnesio, entre otros), Suarez (2002).

Toda esta información se genera en forma geo-referenciada para cada uno de los lotes, posterior a ello, es almacenada en una base de datos. Para poder interpretar y tomar decisiones sin mayor esfuerzo y demanda de tiempo es necesaria la utilización de sistemas versátiles que permitan mostrar la información en mapas temáticos, es así como surge la necesidad de utilizar el SIG en la Finca Comercial de Banano de la Universidad EARTH.

## 2.8. Geoprocesamiento

El geoprocesamiento se basa en un marco de transformación de datos. Una herramienta de geoprocesamiento típica realiza una operación en un dataset de ArcGIS (tal como una clase de entidad, un raster o una tabla) y produce un nuevo dataset como el resultado de la herramienta. Cada herramienta de geoprocesamiento realiza una operación pequeña pero esencial en los datos geográficos, tal como proyectar un dataset de una proyección de mapa a otra, agregar un campo a una tabla o crear una zona de influencia alrededor de las entidades. ArcGIS incluye cientos de herramientas de geoprocesamiento.



El geoprocésamiento permite conectar secuencias de herramientas, utilizando la salida de una herramienta para alimentar a otra. Puede utilizar esta capacidad para componer una cantidad infinita de modelos de geoprocésamiento (secuencias de herramientas) que le ayudan a automatizar su trabajo y a solucionar problemas complejos.

## **2.8.1. Herramientas del Geoprocésamiento**

### **2.8.1.1. Conversión de polígono a raster**

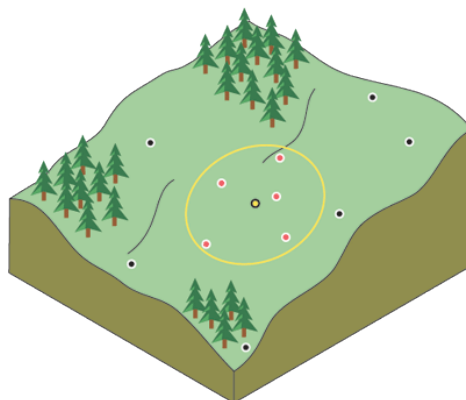
Convierte las entidades de polígono a raster, este se usa de acuerdo a las necesidades, estas pueden ser:

- Cualquier clase de entidad (geodatabase, shapefile o cobertura) que contiene entidades de polígono se puede convertir a un dataset raster.
- El tipo de campo de entrada determina el tipo de raster de salida. Si el campo es entero, el raster de salida será entero, si es punto flotante, la salida será punto flotante.
- Si el campo de entrada contiene valores de cadenas de caracteres, el raster de salida contendrá un campo de valor entero y un campo de cadenas de caracteres.
- No obstante, si el campo es del tipo de punto flotante y los valores se expresan como enteros, el raster de salida será entonces un entero.
- Esta herramienta es un complemento de la herramienta De raster a polígono, que convierte un raster a una clase de entidad poligonal.

- Esta herramienta proporciona un mayor control sobre la asignación de los valores de celdas cuando hay más de una entidad presente en una celda de salida que la herramienta De entidad a raster.

### 2.8.1.2. Interpolación IDW del Spatial Analyst

La interpolación mediante distancia inversa ponderada determina los valores de celda a través de una combinación ponderada linealmente de un conjunto de puntos de muestra. La ponderación es una función de la distancia inversa. La superficie que se interpola debe ser la de una variable dependiente de la ubicación.



Vecindad de IDW del punto seleccionado

Este método presupone que la variable que se representa cartográficamente disminuye su influencia a mayor distancia desde su ubicación de muestra. Por ejemplo, al interpolar una superficie de poder adquisitivo de los consumidores para analizar las ventas minoristas de un sitio, el poder adquisitivo de una ubicación más distante tendrá menos influencia porque es más probable que las personas compren cerca de sus casas.

### 2.8.1.2.1. Controlar la influencia con el parámetro Potencia

El método IDW está basado principalmente en la inversa de la distancia elevada a una potencia matemática. El parámetro Potencia le permite controlar la significancia de puntos conocidos en los valores interpolados basándose en la distancia desde el punto de salida. Es un número real positivo y su valor predeterminado es 2.

Al definir un valor de potencia más alto, se puede poner más énfasis en los puntos más cercanos. Entonces, los datos cercanos tendrán más influencia y la superficie tendrá más detalles (será menos suave). A medida que aumenta la potencia, los valores interpolados comienzan a acercarse al valor del punto de muestra más cercano. Al especificar un valor más bajo de potencia, los puntos circundantes adquirirán más influencia que los que están más lejos, lo que resulta en una superficie más suave.

Debido a que la fórmula de IDW no está relacionada con ningún proceso físico real, no hay forma de determinar que un valor de potencia en particular es demasiado grande. Como guía general, una potencia de 30 se considera extremadamente grande y su uso sería cuestionable. También tenga en cuenta que si las distancias o el valor de potencia son grandes, los resultados pueden ser incorrectos.

Podría decirse que el valor óptimo para la potencia es donde el error absoluto medio mínimo se encuentra en su punto más bajo. ArcGIS Geostatistical Analyst proporciona una forma de investigar esto.



### **2.8.1.2.2. Limitar los puntos utilizados para la interpolación**

Las características de la superficie interpolada también pueden controlarse limitando los puntos de entrada que se utilizan en el cálculo de cada valor de celda de salida. Limitar la cantidad de puntos de entrada considerados puede mejorar la velocidad de procesamiento. También tenga en cuenta que los puntos de entrada que están lejos de la ubicación de la celda donde se realiza la predicción pueden tener escasa o ninguna correlación espacial, esto puede ser una razón para eliminarlos del cálculo.

Puede especificar la cantidad de puntos a utilizar directamente o especificar un radio fijo dentro del cual se incluirán los puntos en la interpolación.

### **2.8.1.2.3. Radio de búsqueda variable**

Con un radio de búsqueda variable, se especifica la cantidad de puntos utilizados para calcular el valor de la celda interpolada, lo que hace que la distancia del radio varíe para cada celda interpolada, según qué tan lejos deba buscar alrededor de cada celda interpolada para alcanzar la cantidad especificada de puntos de entrada. Entonces, algunas vecindades serán pequeñas y otras grandes, según la densidad de los puntos medidos cerca de la celda interpolada. También puede especificar una distancia máxima (en unidades de mapa) que el radio de búsqueda no debe sobrepasar. Si el radio de una vecindad determinada alcanza la distancia máxima antes de obtener la cantidad especificada de puntos, la predicción de esa ubicación se realizará basada en la cantidad de puntos medidos dentro de la distancia máxima. Por lo general, utilizará vecindades más

pequeñas o una cantidad mínima de puntos cuando el fenómeno tiene una gran cantidad de variación.

#### **2.8.1.2.4. Radio de búsqueda fijo**

Para un radio de búsqueda fijo se requiere una distancia de vecindad y una cantidad mínima de puntos. La distancia indica el radio del círculo de la vecindad (en unidades de mapa). La distancia del radio es constante, por lo que para cada celda interpolada, el radio del círculo utilizado para hallar los puntos de entrada es el mismo. La cantidad mínima de puntos indica la cantidad mínima de puntos medidos a usar dentro de la vecindad. Todos los puntos medidos que caen dentro del radio se utilizarán en el cálculo de cada celda interpolada. Cuando hay menos puntos medidos en la vecindad que el mínimo especificado, el radio de búsqueda aumentará hasta que pueda abarcar la cantidad mínima de puntos. El radio de búsqueda fijo especificado se utiliza para cada celda interpolada (celda central) en el área de estudio; por lo tanto, si sus puntos medidos no están distribuidos de forma pareja (rara vez lo están), es posible que haya diferentes cantidades de puntos medidos utilizados en las diferentes vecindades para las diversas predicciones.

#### **2.8.1.2.5. Usar las barreras**

Una barrera es un dataset de polilínea utilizado como línea de corte que limita la búsqueda de los puntos de muestra de entrada. Una polilínea puede representar un acantilado, una cresta u otra interrupción en un paisaje. Solo se considerarán

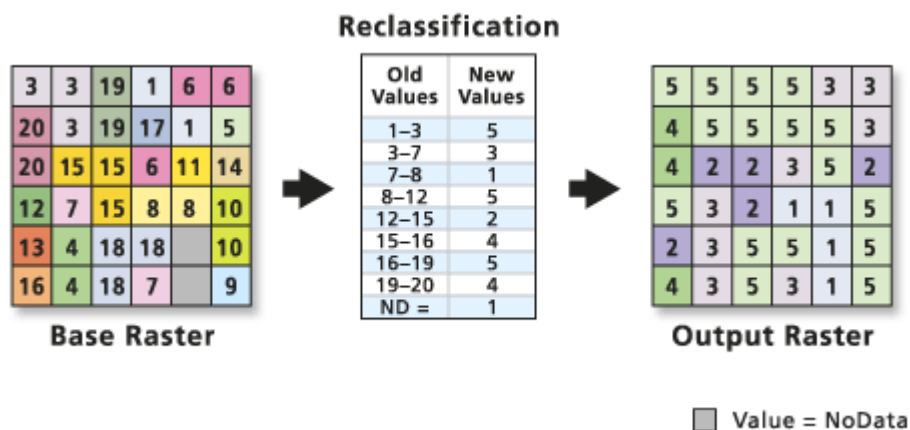
los puntos de muestra de entrada que estén del mismo lado de la barrera que la celda de procesamiento actual.

### **2.8.1.3. Reclasificación por rango de valores**

Es posible que deba reclasificar un rango de valores a un valor alternativo y otro rango a otro valor alternativo diferente. Por ejemplo, en el raster de entrada de uso del suelo de un modelo de adecuación de construcción para una casa, todos los valores residenciales y las actividades humanas varían de 0 a 9, los valores de bosque varían de 10 a 19 y los valores de agricultura, de 20 a 29. Es posible que deba asignar una adecuación de 1 a los valores de uso del suelo del 0 al 9 (la actividad humana), 5 a los valores de uso del suelo entre 20 y 30 (la agricultura), y 10 a los valores de uso del suelo entre 10 y 19 (el bosque). Sería tedioso si tuviera que especificar explícitamente cada valor de uso del suelo existente y los valores alternativos, ya que son numerosos.

Al reclasificar por rangos de valores, las herramientas de reclasificación requieren límites inferiores y superiores de los valores existentes en el raster de entrada y el valor alternativo que se va a asignar al rango de valores. Todos los valores del raster original que caen en el rango especificado de valores recibirán el valor alternativo asignado a ese rango. Los cortes del límite de rango se tratarán de manera diferente en cada herramienta. Es decir, si se especifican dos rangos, como 1 a 5 igual a 100 y 5 a 10 igual a 200, el valor 5 generalmente será asignado al valor 100 y 5,01 será asignado a 200 como valores de salida.

En el siguiente ejemplo se reclasifican los valores originales del raster base por rangos a nuevos valores reclasificados:



Generalmente se reclasifican rangos de valores cuando los valores de entrada son continuos (por ej. elevación o distancia) o cuando se cambian los grupos de datos categóricos como en el ejemplo anterior sobre el uso del suelo.

Los rangos de valores se pueden reclasificar fácilmente mediante la herramienta Reclasificar. El cuadro de diálogo de la herramienta también admite métodos de clasificación manual, de intervalos iguales, de intervalos definidos, de cuantiles, de cortes naturales (Jenks) y de desviación estándar para la clasificación de los datos originales.

#### 2.8.1.4. Superposición ponderada

La herramienta Superposición ponderada aplica uno de los enfoques para el análisis de superposición más utilizados para resolver problemas de varios criterios como la selección de sitios y los modelos de adecuación. En un análisis de superposición ponderada, se sigue cada uno de los pasos del análisis de superposición general.

Como en todo análisis de superposición, en el análisis de superposición ponderada, debe definirse el problema, dividirse el modelo en submodelos e identificarse las capas de entrada.

Cuando las capas de criterios de entrada están en sistemas de numeración distintos con rangos distintos, cada celda de cada criterio se debe reclasificar con una escala de preferencia común como 1 a 10, siendo 10 el más favorable, para combinarlas en un único análisis. Una preferencia asignada en la escala común implica la preferencia del fenómeno para el criterio. Los valores de preferencia están en una escala relativa. Es decir, una preferencia de 10 es dos veces una preferencia de 5.

Los valores de preferencia no sólo deben asignarse en relación a los otros valores dentro de la capa sino que también deben tener el mismo significado entre las capas. Por ejemplo, si a la ubicación para un criterio se le asigna una preferencia de 5, tendrá la misma influencia en el fenómeno que una preferencia de 5 en un segundo criterio.

### 3. Metodología

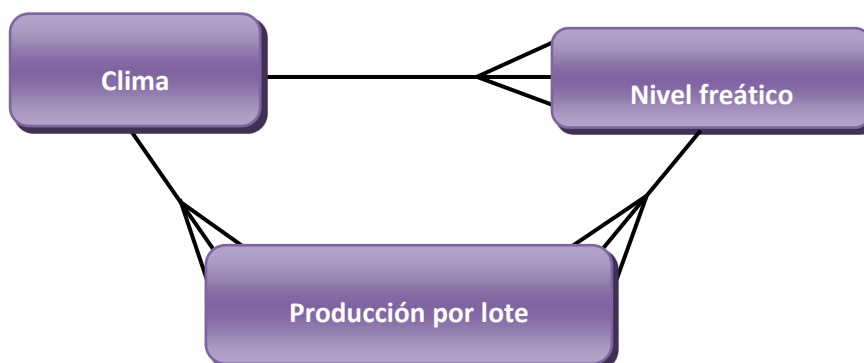
#### 3.1. Conceptualización

Los componentes y las variables utilizadas para monitorear y definir las repuestas del cultivo fueron:

Componentes	Variables	Lógico
Producción (P)	Peso racimos	$P \times NF$
Nivel freático (NF)	Lectura de pozo	$C \times NF$
Clima (C)	Precipitación	$C \times P \times NF$

*Modelo Lógico*

#### Entidades y relaciones (ER)



#### Entidades y atributos (EA)



### 3.2. Captura de Datos

En la tabla 1, se establecen las unidades de medición, la periodicidad, la época y la unidad espacial para cada variable.

**Tabla 1.** Unidades de medición, periodicidad y unidades de medida espacial para los componentes evaluados

Componentes	Variables	Unidad medida	Periodicidad	Unidad espacial
Producción (P)	Peso racimos	Kilogramos (kg)	Semanal	Lote
Nivel freático (NF)	Profundidad nivel freático	Centímetros (cm)	Semanal	Pozo freaticométrico
	Altura nivel freático	Metros sobre el nivel del mar (msnm)	Semanal	Pozo freaticométrico
Clima	Precipitación	Milímetros (mm)	Semanal	Finca

En el desarrollo de este trabajo se utilizó:

- *El Software:* ArcGIS, Excel, Word, Trópico fincas (desarrollado para manejo de información de fincas).
- *Hardware:* GPS Trimble GeoXT, Computador portátil, Bascula electrónica Trutest XR3000, Pozos freaticométrico, Pluviómetro.
- *Equipo técnico:* Equipo administrativo de la finca, Ingeniero agrónomo, Estudiante maestría SIG.

### 3.3. Recolección e Ingreso de datos

La finca El Paso inicio su proceso de producción de banano de exportación hace ya más de 40 años, presentando diferentes cambios en su tamaño y estructura, debido a la adhesión de nuevos terrenos, lo cual, ha hecho cambiar el número de lotes (unidades de producción mínima), quedando con a un total de 34 lotes hasta la fecha; estos fueron georeferenciados con ayuda del GPS

Trimble GeoXT (ver figura 3). De esta manera se determinó la unidad de manejo administrativo y por sitio específico para la toma de peso de racimo (kilogramos) en empacadora con la ayuda de la báscula electrónica Trutest XR3000 (ver figura 3).

Así mismo con el GPS Trimble GeoXT, se georeferenciaron los pozos freáticos (ver figura 3) que se encuentra ubicados por toda la finca, excepto los pozos número 11, 18 y 34 que se encontraban fuera de servicio, también se nivelaron las alturas a que se encontraban cada uno de ellos respecto al nivel del mar (con el GPS debidamente calibrado).

También se georeferenció el pluviómetro (ver figura 3) para la toma de datos de precipitación, esta fue tomada diariamente todas las mañana a las 7:00 AM, pero por términos de comparación con los datos del movimiento del nivel freático se procesaron de manera semanal, sumando las lecturas de todos los días de cada semana (de lunes a domingo).

Todos estos datos recolectados para cada variable fueron digitados en la oficina de la finca y se almacenaron en un software desarrollado por la Compañía C.I. Uniban S.A., llamado Trópico Fincas, el cual, funciona en línea con sus servidores; de allí se tomó y proceso bajo el esquema definido en la conceptualización, ser modelada y analizada en el Excel de Office 2010 y ArcGIS 10, utilizando las herramientas de interpolation IDW, Surface, Weighted Overlay, Reclassify del Spatial Analyst.



### 3.4. Indicadores y variables

Los indicadores evaluados están relacionados entre sí (productividad, el nivel freático y precipitación) de acuerdo a los manejos aplicados en la finca, estos se definen y conceptualizan en:

#### *Productividad.*

- Promedio peso de racimo en kilogramos cosechado por lote semanalmente.
- Conceptualización espacial de lotes en formato vector (shape) como polígono.

#### *Profundidad del Nivel freático.*

- Límite superior del agua subterránea en relación con la superficie del suelo en centímetros, medido en cada uno de los pozos freaticométricos distribuidos en la finca, las lecturas se tomaran cada semana.
- Conceptualización espacial de pozos, en formato vector (shape) como punto y las isobatas e isohipsas son generadas en formato raster reclasificadas.

#### *Precipitación.*

- Lluvias medida en milímetros, estos se tomara cada vez que se presenten estos eventos, la lectura es tomada únicamente a las 7:00 AM.
- Pluviómetro en formato vector (shape) como punto.

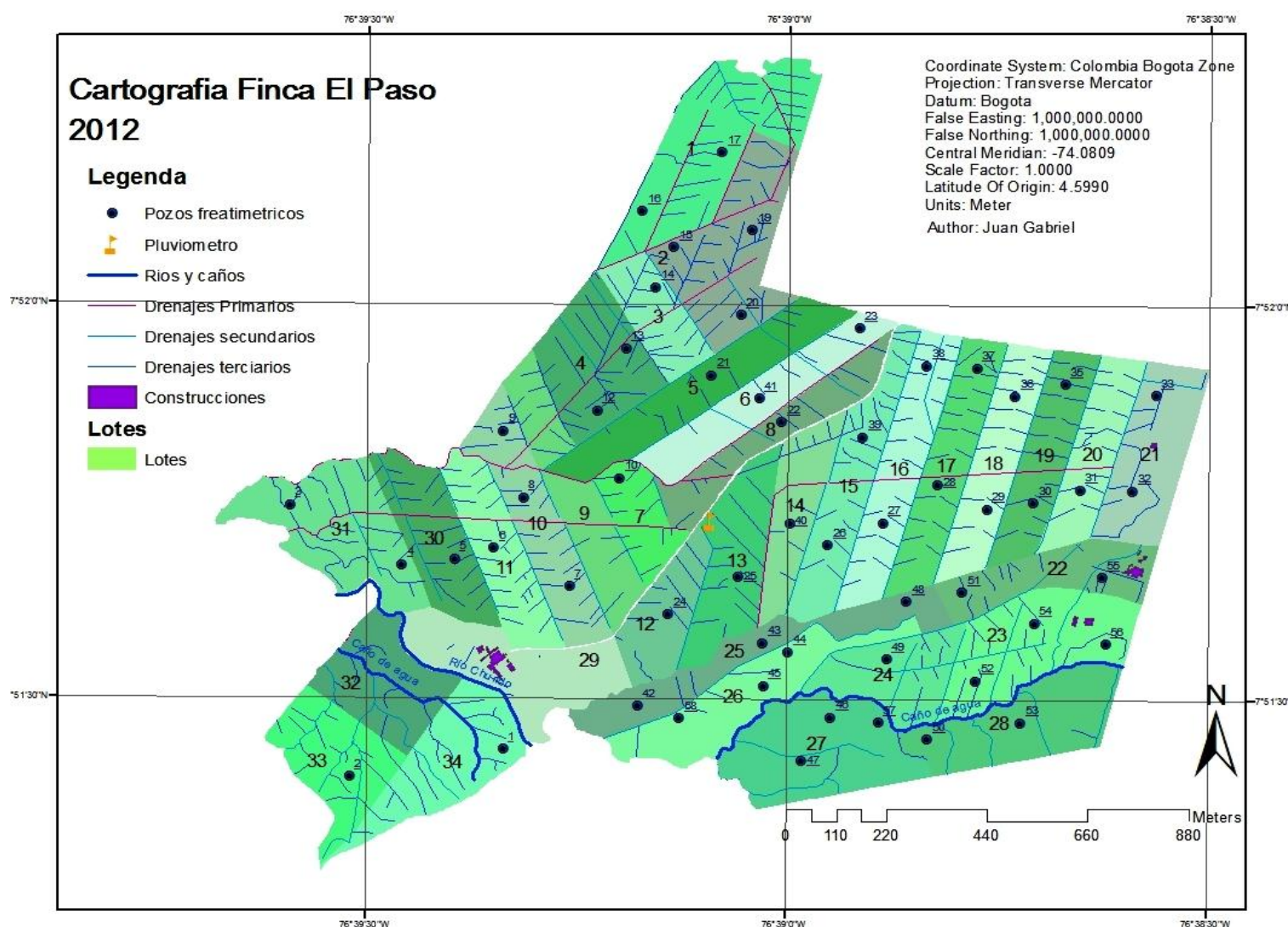


**Figura 3.** Equipos para la toma de datos en campo, donde, de izquierda a derecha se tiene pluviómetro, pozo freaticométrico, báscula peso racimo y GPS.

## 4. Resultados

### 4.1. Datos de entrada

Los datos de entrada para el análisis aplicado fueron básicamente datos históricos de precipitación, nivel freático y peso de racimo, tomados en campo en pluviómetros, pozos freáticos y lotes respectivamente; estas mediciones fueron realizadas entre el la semana 49 del 2010 y semana 12 del 2012.



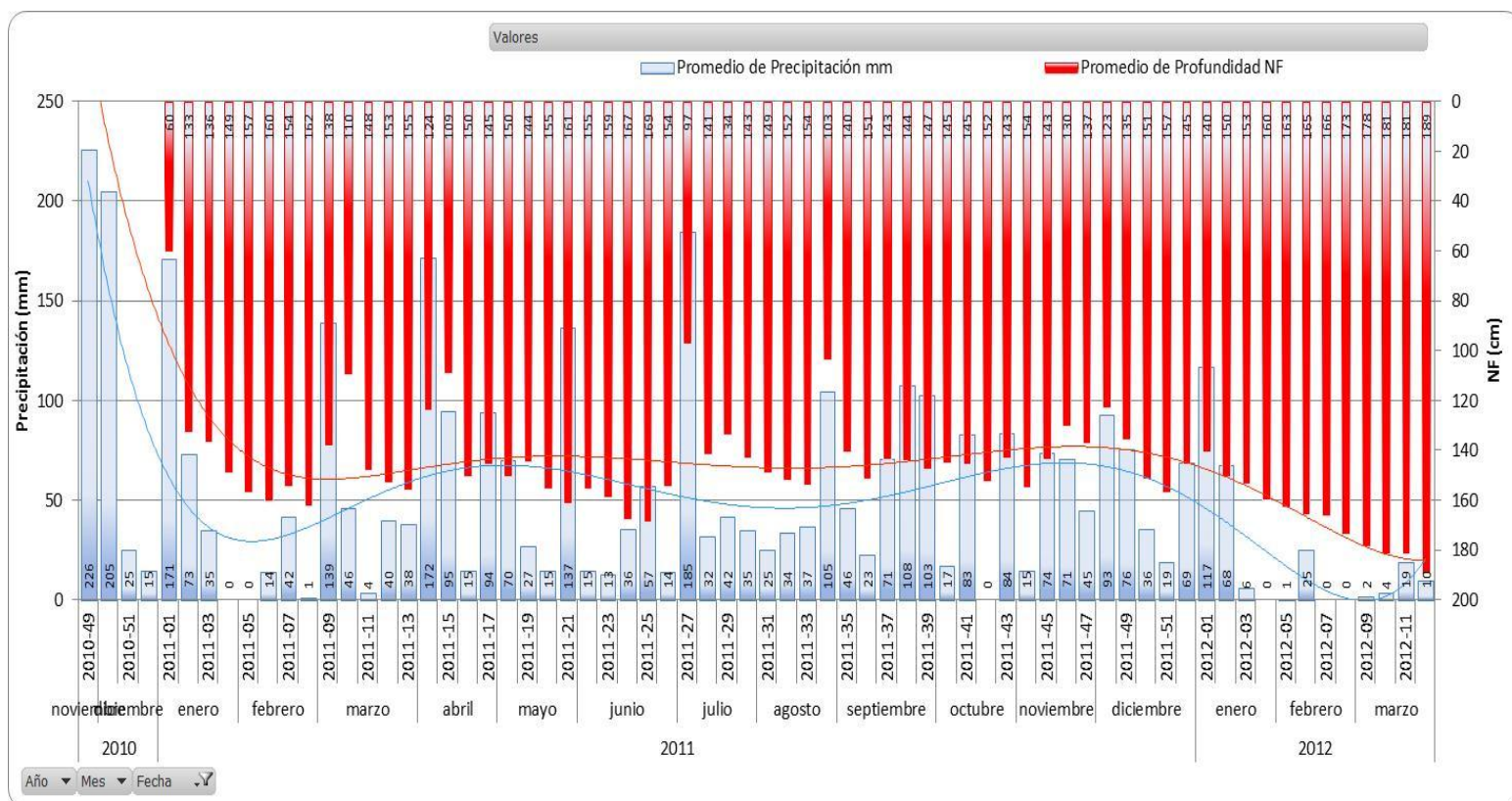
**Figura 4.** Cartografía de la finca donde se ubican los lotes, ríos - caños, pozos freáticos, pluviómetro y empacadora (construcción) donde se toman los pesos de racimos.



#### 4.1.1. Datos de precipitación (pluviómetro)

Los datos de precipitación se tomaron diariamente desde la semana 49 del 2010 hasta la 12 del 2012, estos se agregaron a nivel semanal, realizando una suma de los datos que se tenían entre lunes y domingo de acuerdo al calendario bananero establecido en la zona, además para ser comparados con el nivel freático y pesos de racimos ver figuras 5 y 7.

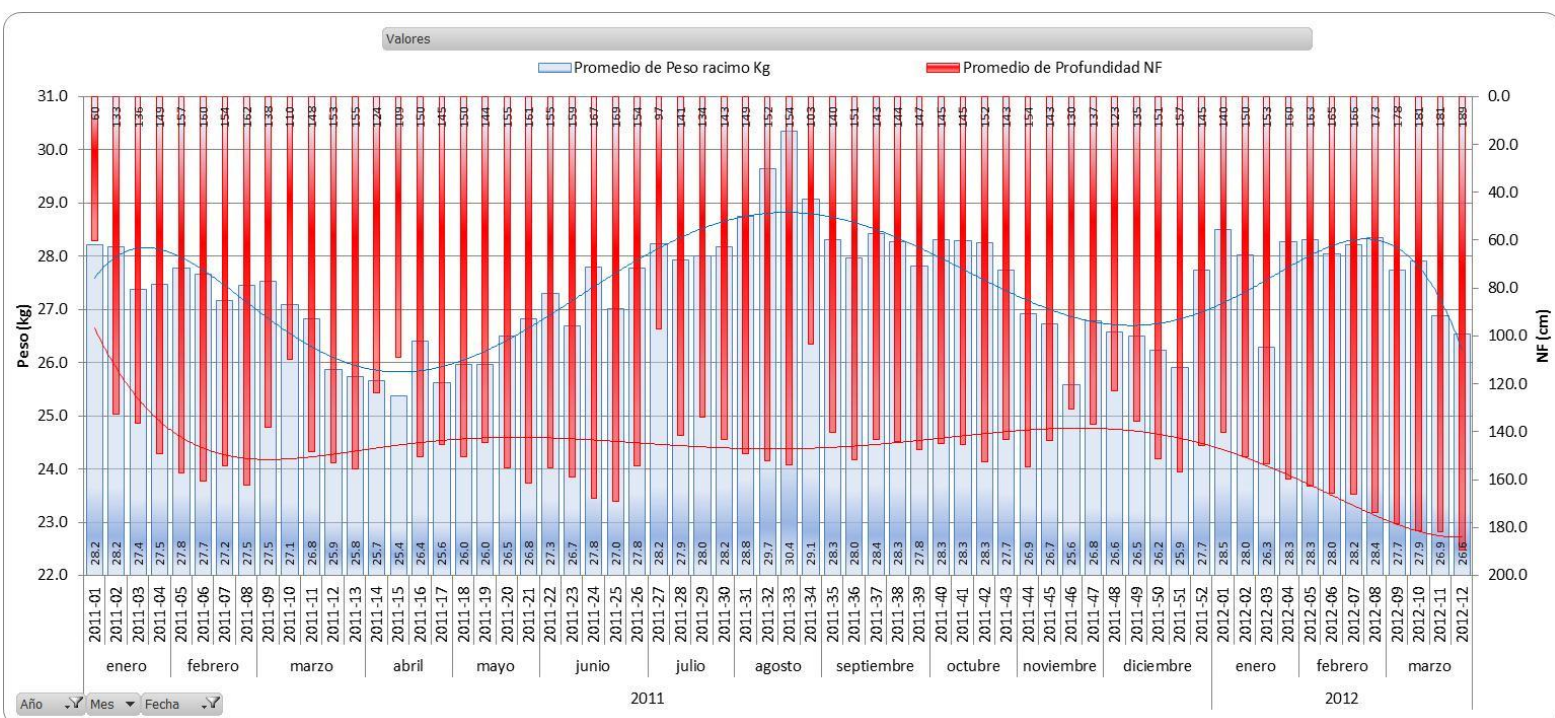
La ubicación espacial del pluviómetro se realizó teniendo en cuenta un punto medio de la finca como se observa en la figura 4.



**Figura 5.** Comportamiento histórico de la precipitación y profundidad del nivel freático promedio de la finca el Paso entre las semanas 49 de 2010 y 12 de 2012.

#### 4.1.2. Datos de profundidad nivel freático (pozos freaticométricos)

Los datos de profundidad del nivel freático provinieron de 58 pozos freaticométricos georeferenciados (figura 4) en la finca; estos fueron colectados con una frecuencia semanal (figura 5) durante la semana 1 del 2011 a la 12 del 2012, mostrando la profundidad a la que se encuentra el nivel de agua en el suelo, que afecta el cultivo de manera directa cuando esta se encuentra muy cerca de la superficie del suelo (tabla 2).



**Figura 6.** Comportamiento de la profundidad del nivel freático y peso de racimo de la finca El Paso entre las semanas 49 de 2010 y 12 de 2012.

#### 4.1.3. Datos de peso racimo (báscula electrónica)

Los datos de pesos de racimos fueron tomados por la báscula electrónica Trutest XR3000 ubicada en la empacadora donde se realiza el proceso postcosecha<sup>1</sup>; estos racimos son cosechados en los días de embarque y provienen de los 34

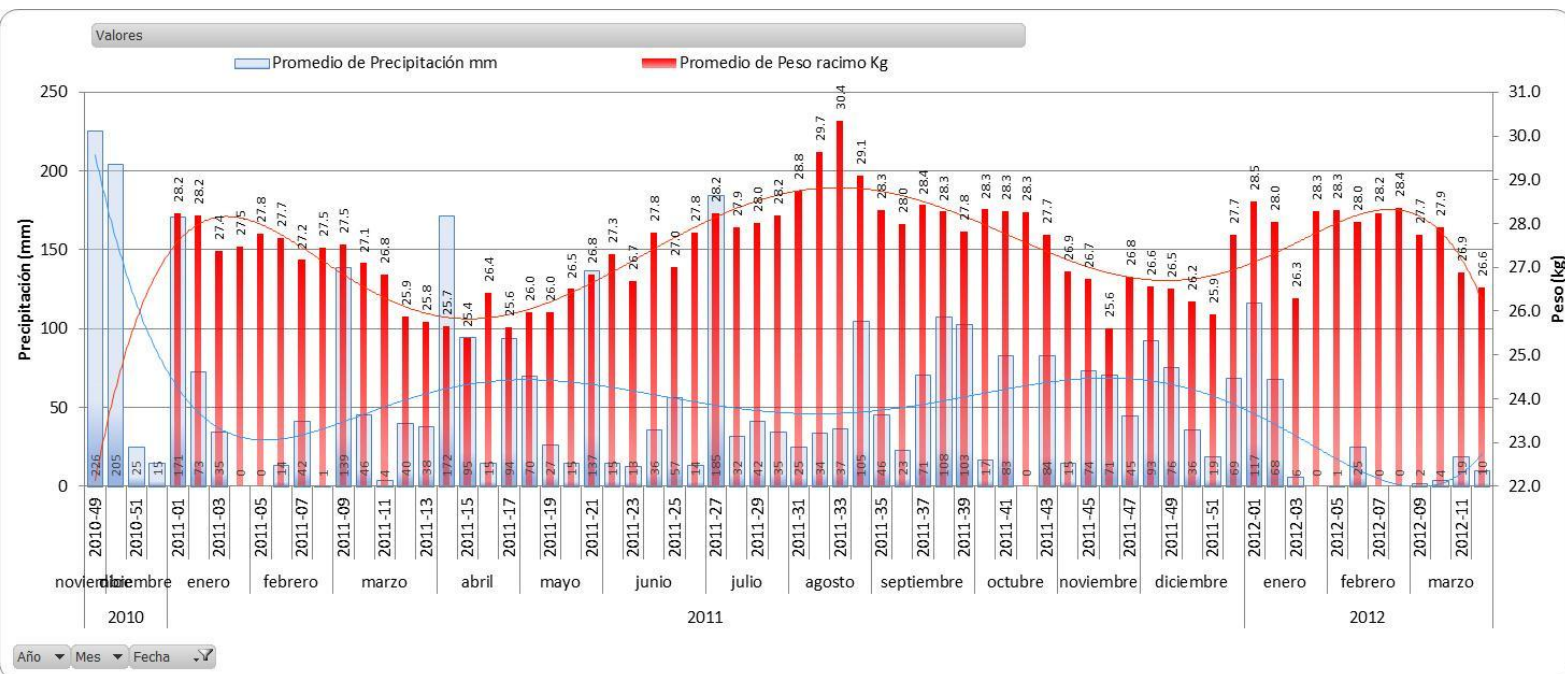
lotes georeferenciados (figura 4). Estos datos fueron tomados con una frecuencia diaria y clasificados por lote entre las semanas 1 del 2011 a la 12 del 2012.

Por mayor manejo y comparación los datos se agruparon de forma semanal (promedio de pesos diarios) por lote (figuras 6 y 7), para preparar su estudio.

**Tabla 2.** Clasificación de rangos establecidos para el cultivo de banano a nivel de la zona de Urabá Colombia, para la profundidad de nivel freático, peso de racimos y aptitud para producción de banano

Color	Escala Profundidad Nivel Freático		Escala Peso de Racimo		Escala Superposición	
Color del rango	Rango Nivel Freático (cm)	Valoración	Rango Peso (Kg)	Valoración	Rango de Aptitud	Valoración
Rojo	< 50	Muy superficial	< 20	Muy bajo	1	Muy malo
Naranja	50 - 75	Superficial	20 - 24	Bajo	2	Malo
Amarillo	75 - 100	Moderadamente profundo	24 - 28	Medio	3	Regular
Azul	100 - 150	Profundo	28 - 32	Alto	4	Bueno
Verde	> 150	Muy profundo	> 32	Muy Alto	5	Muy bueno

Fuente: Manual de buenas prácticas agrícolas para banano C.I. Uniban S.A. 2003



**Figura 7.** Comportamiento de la precipitación y peso de racimo de la finca El Paso entre las semanas 49 de 2010 y 12 de 2012.

## **4.2. Metodología aplicada y resultados principales**

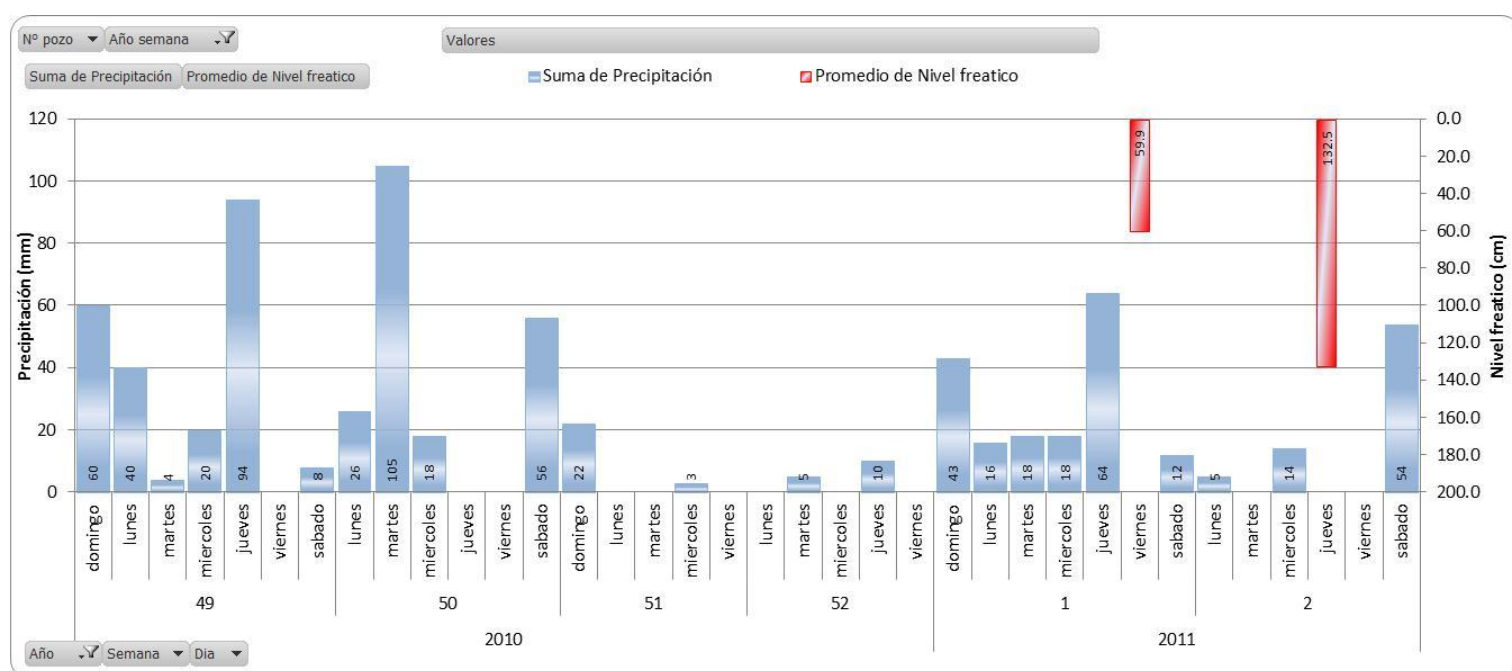
### **4.2.1. Organización de datos de entrada y observaciones generales**

Como se mencionó anteriormente se agregaron los datos diarios (caso precipitación y peso racimo) hasta un nivel semanal (caso observaciones freaticas) para facilitar todos los análisis ulteriores.

La figura 5 muestra el comportamiento de la precipitación y el promedio de nivel freático de los 58 pozos freaticos de la finca, para las semanas 49 del 2010 a la 12 del 2012. Como se puede observar la precipitación presenta una alta variabilidad a través de las semanas estudiadas, observándose en el primer trimestre del año 2011 de forma aislada lluvias muy altas seguidas de muy bajas; a partir del segundo trimestre se inician eventos de lluvias más seguidas, las cuales se estabilizan de forma constante en el tercer y cuarto trimestre, para luego nuevamente mostrar precipitaciones muy bajas en el primer trimestre del año 2012, este fenómeno es muy cíclico y marcado en la zona de Urabá, ya que se presentan dos temporadas climáticas, una de verano en el primer trimestre y una de invierno que inicia paulatinamente en el segundo trimestre y termina en el cuarto; cabe decir que en esta temporada de invierno se presentan de forma aislada bajas precipitaciones denominadas veranillos, los cuales se pueden observar muy bien en las semanas 22, 23 y 42 del 2011 como se muestra en la figura 5, esto coincide con lo expresado por ILI en 1978.

El nivel freático presenta sus valores más superficiales durante las épocas inmediatamente posteriores a aquellas de mayor precipitación tanto de forma individual como acumulada (suma de varios eventos sucesivos), mostrando una

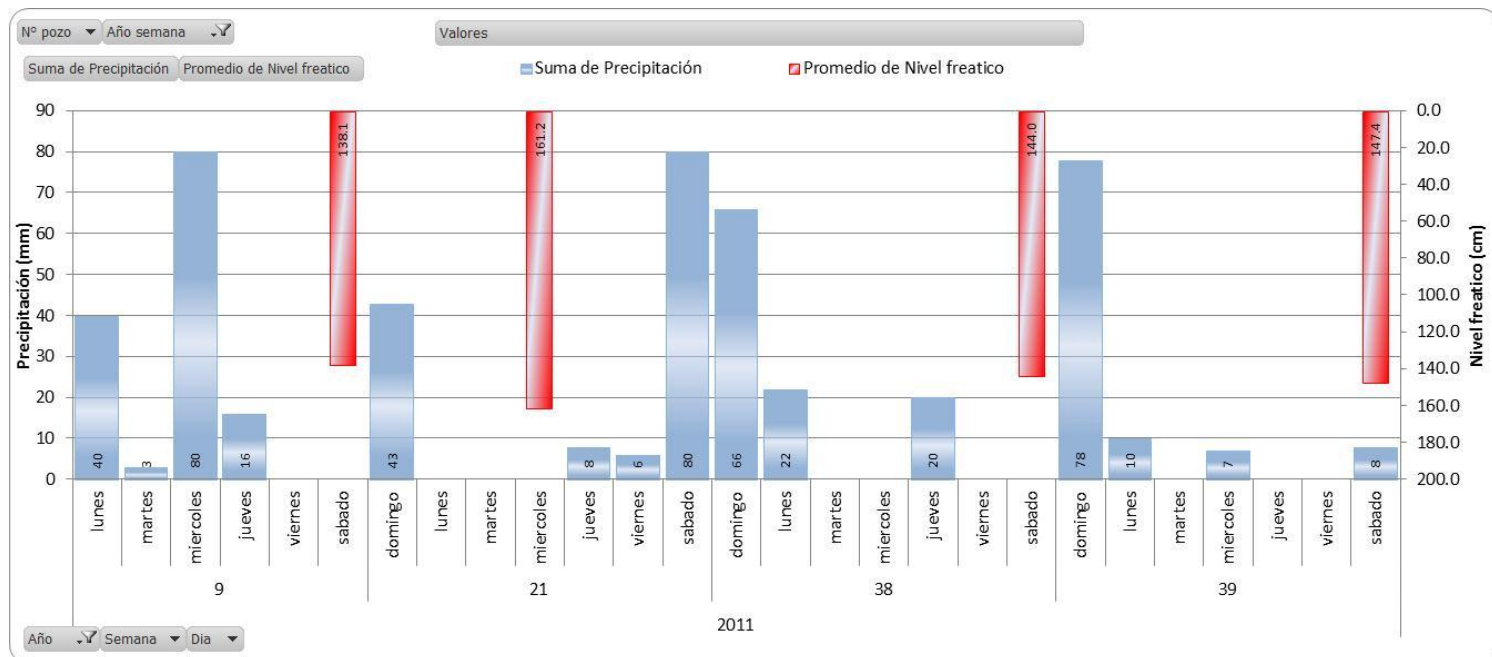
influencia directa del nivel freático con la precipitación, la cual satura el suelo con la alta cantidad de agua que contribuye; este evento se puede observar muy bien en la semana 1 del 2011, donde después de lluvias acumuladas presentadas entre las semanas 49 del 2010 a la 01 del 2012, el nivel freático subió a un nivel superficial de 59.9 cm respecto al suelo (ver figura 8).



**Figura 8.** Comportamiento del nivel freático diario, en la semana 1 del 2011 de acuerdo a la precipitación acumulada en las semanas 49 a la 52 del 2010 y 1 del 2011.

En la figura 5 se evidencia un comportamiento incoherente entre el nivel freático y la precipitación en las semanas 9, 21, 38 y 39, esto se debe a que las precipitaciones altas se presentaron después de haber toma los datos (ver figura 9); esto nos ayuda a entender que los datos deben ser analizados muy cuidadosamente antes de dar conclusiones erróneas.



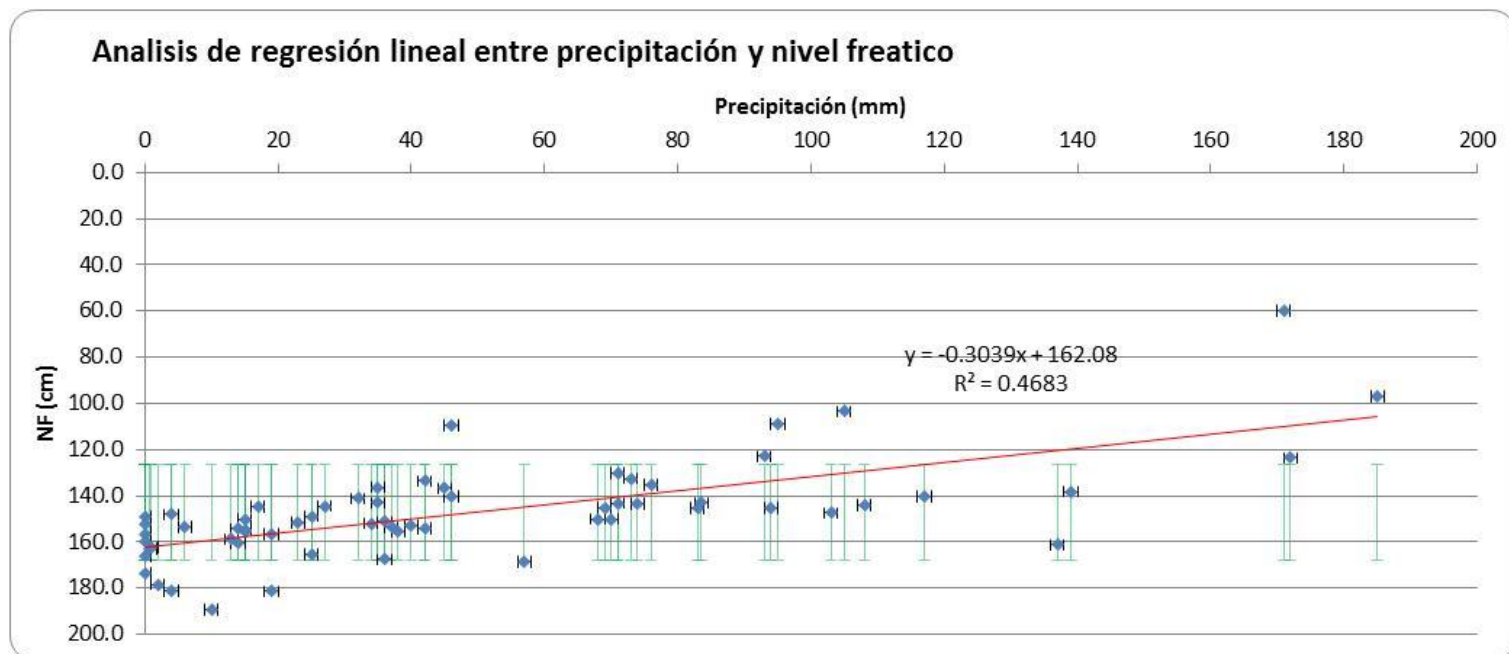


**Figura 9.** Comportamiento del nivel freático detallado día a día en las semanas 9, 21, 38 y 39 del 2011, donde sus lecturas fueron incoherentes al llevarlas a un nivel semanal.

En el análisis de dispersión hecho entre las variables de precipitación (independiente) y nivel freático (dependiente) se observa una correlación positiva fuerte, la cual muestra una influencia directa de la precipitación sobre el nivel freático por la saturación de agua al suelo (figura 10) durante la misma semana evaluada, como se puede observar en la figura 5. Esto indica que es adecuada la agrupación de los datos hasta un nivel semanal, claro está teniendo muy en cuenta que la toma de datos debe hacerse en los momentos indicados entre 48 y 72 horas después de un evento. Lo anterior coincide mucho con lo descrito por Van der Sluijs y De Gruijter (1985).

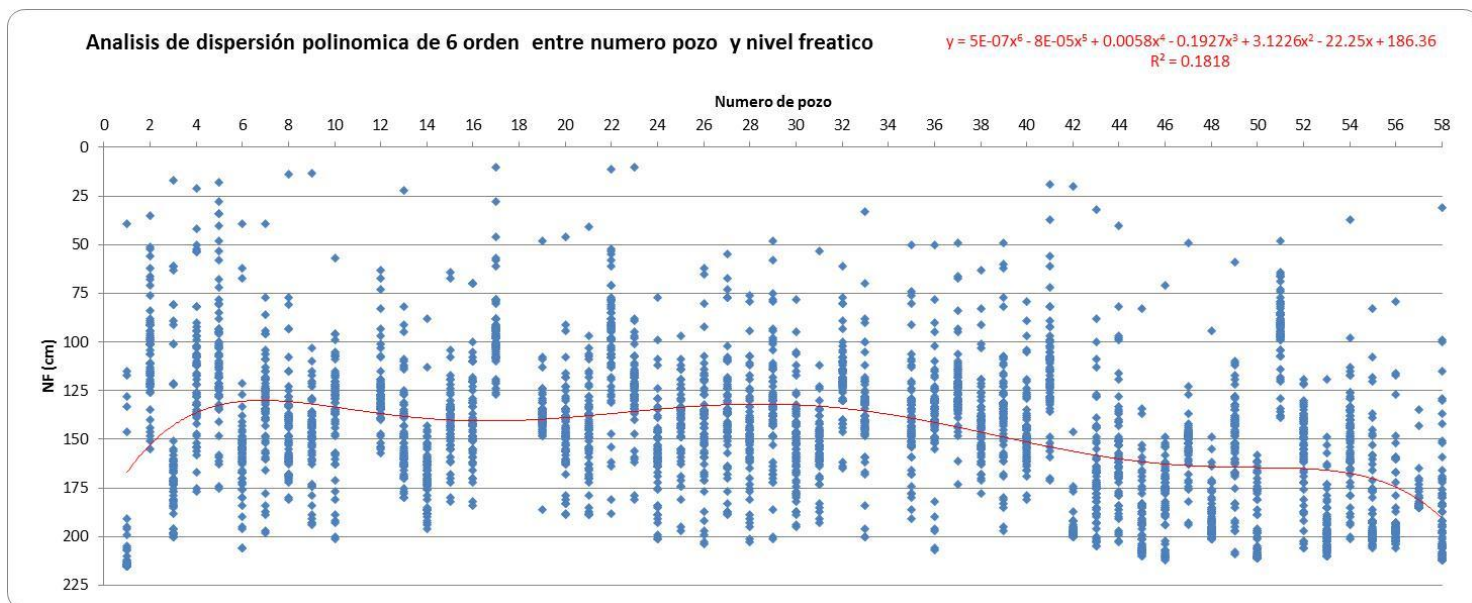
Realizando un análisis de dispersión del nivel freático de todos los datos evaluados entre la semana 1 del 2011 a la 12 del 2012, se presenta que los pozos que más presentan un nivel superficial (más cercano al nivel del suelo) son los pozos 5 al 34, los demás presentan una tendencia más profunda. Cabe decir que

aun que se presente lo anteriormente descrito todos los pozos presenta una tendencia a estar por debajo del metro de profundidad lo se muestra en la figura 11.

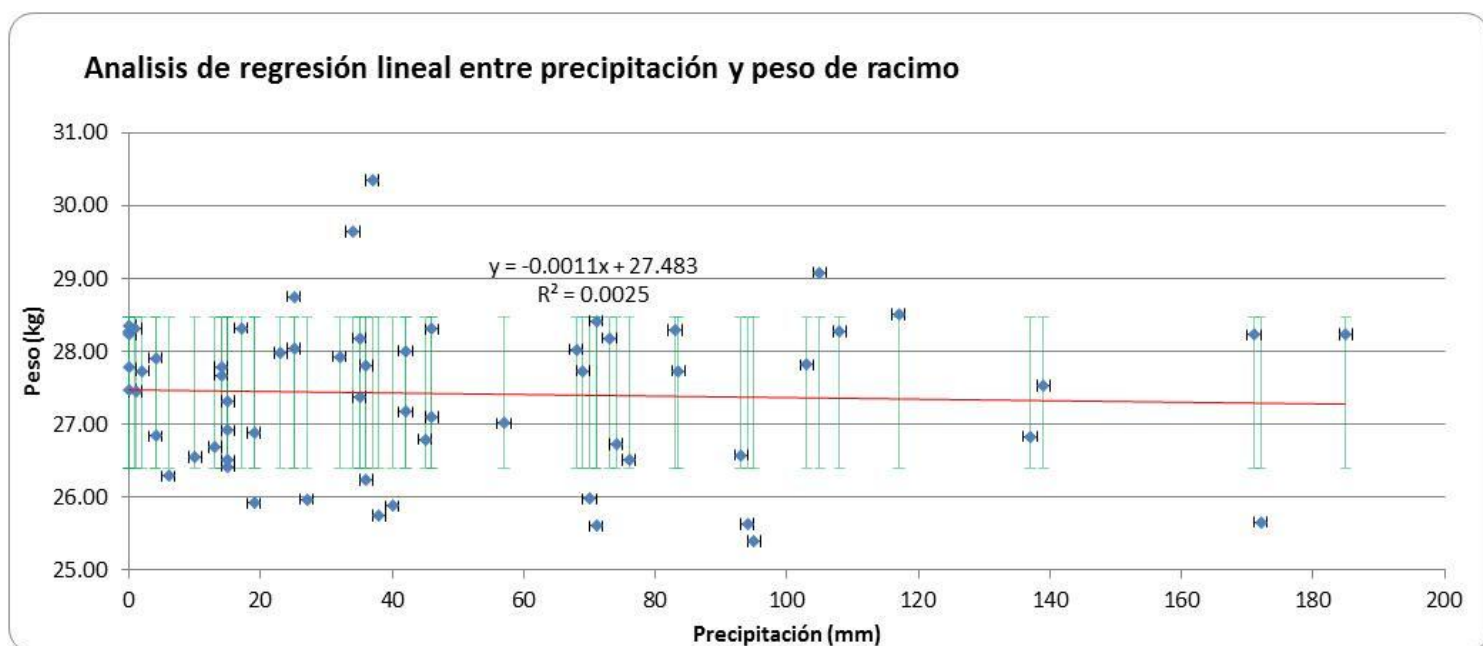


**Figura 10.** Diagrama de dispersión y regresión entre las variables de nivel freático (dependiente) y precipitación (independiente).

En la figura 6 y 7 se presenta el comportamiento de los peso de racimos, el cual, no varía mucho entre una semana y otra; pero analizando en el año se puede evidenciar que la curva de pesos tiene un comportamiento característico, en donde, el primer trimestre del año 2011 se observa una tendencia a la baja, seguido de un aumento significativo en el segundo trimestre, el cual, tiende a estabilizarse en el tercer y cuarto trimestre, para luego volver a bajar en el primer trimestre del año 2012. Esto es muy similar a lo descrito anteriormente en la precipitación.



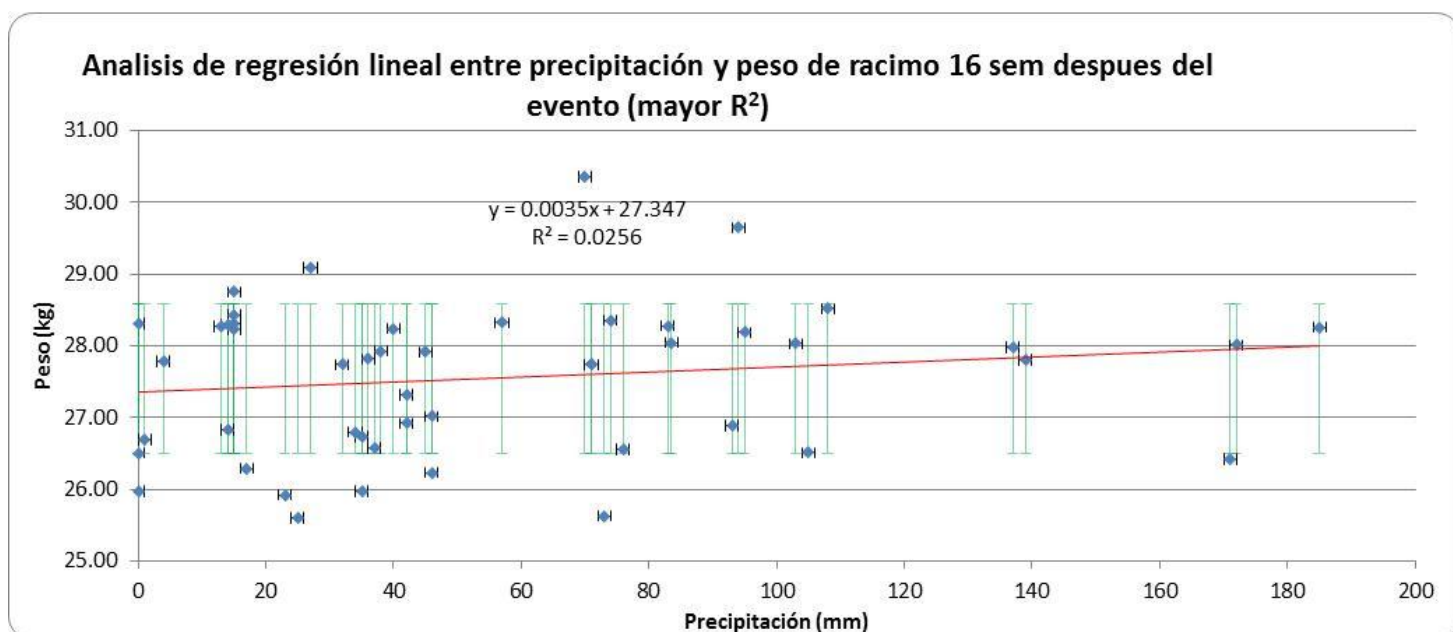
**Figura 11.** Gráfica de dispersión de la profundidad del nivel freático en cada pozo de observación de las semanas 01 del 2011 a la 12 del 2012.



**Figura 12.** Diagrama de dispersión y regresión entre las variables de peso (dependiente) y precipitación (independiente) en las mismas semanas evaluadas.

Es por esto que se realizó un análisis de regresión entre el peso de racimo y las variables de precipitación y nivel freático evidenciando que:

En la figura 12, donde se muestra un diagrama de dispersión entre el peso y la precipitación se observa que una correlación positiva muy leve, la cual no muestra ninguna relación entre una variable y otra; pero, se evidencio que la correlación más alta entre las dos variables se presentó a las 16 semanas después de un evento de precipitación (ver figura 13) afectando el peso de los racimos cosechados, es decir a las 5 semanas antes de parición de los racimos.

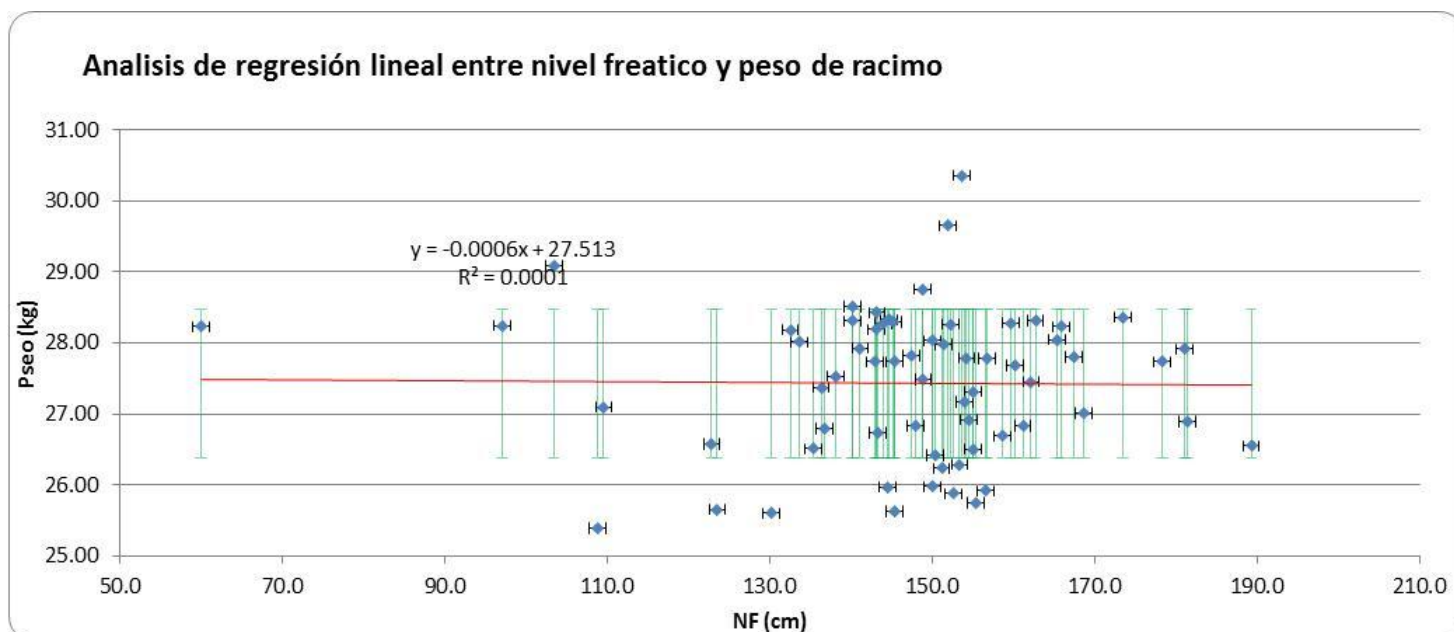


**Figura 13.** Diagrama de dispersión y regresión entre las variables de peso (dependiente) y precipitación (independiente) 16 semanas después del evento del nivel freático.

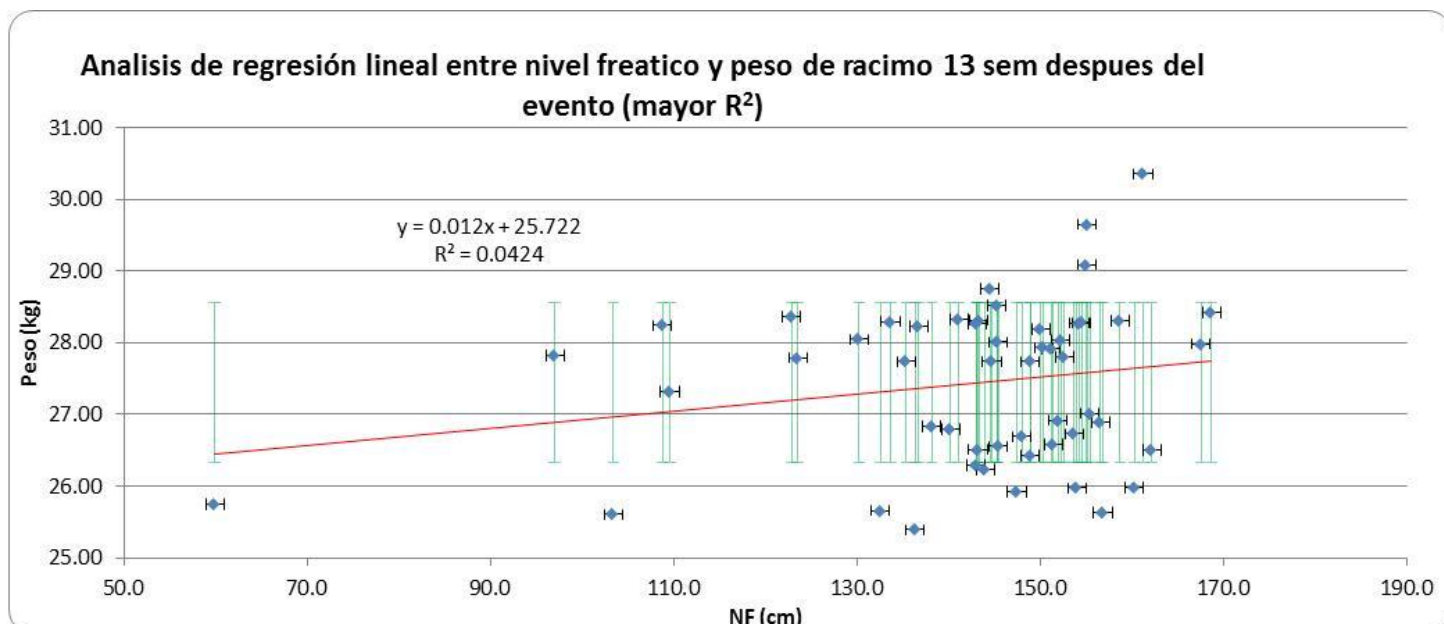
En la figura 14 se muestra el coeficiente de determinación entre las variables de peso y nivel freático en las mismas semanas evaluadas (calendario); en estas no se evidencia una relación significativa, es más se puede decir que es nula, pero a las 13 semanas después de ocurrido un evento significativo en el nivel freático el peso de racimo es muy afectado por este como se observa en la figura 15.

Esto se observa claramente en la figura 6, donde, en la semana uno se tienen el nivel freático más bajo, el cual influye en el peso de racimos desde la semana 12

a la 14, ya que la fruta que pario en esa misma semana se vio afectada drásticamente; es importante decir que el banano se cosecha desde la décima hasta doceava semana después de parida.

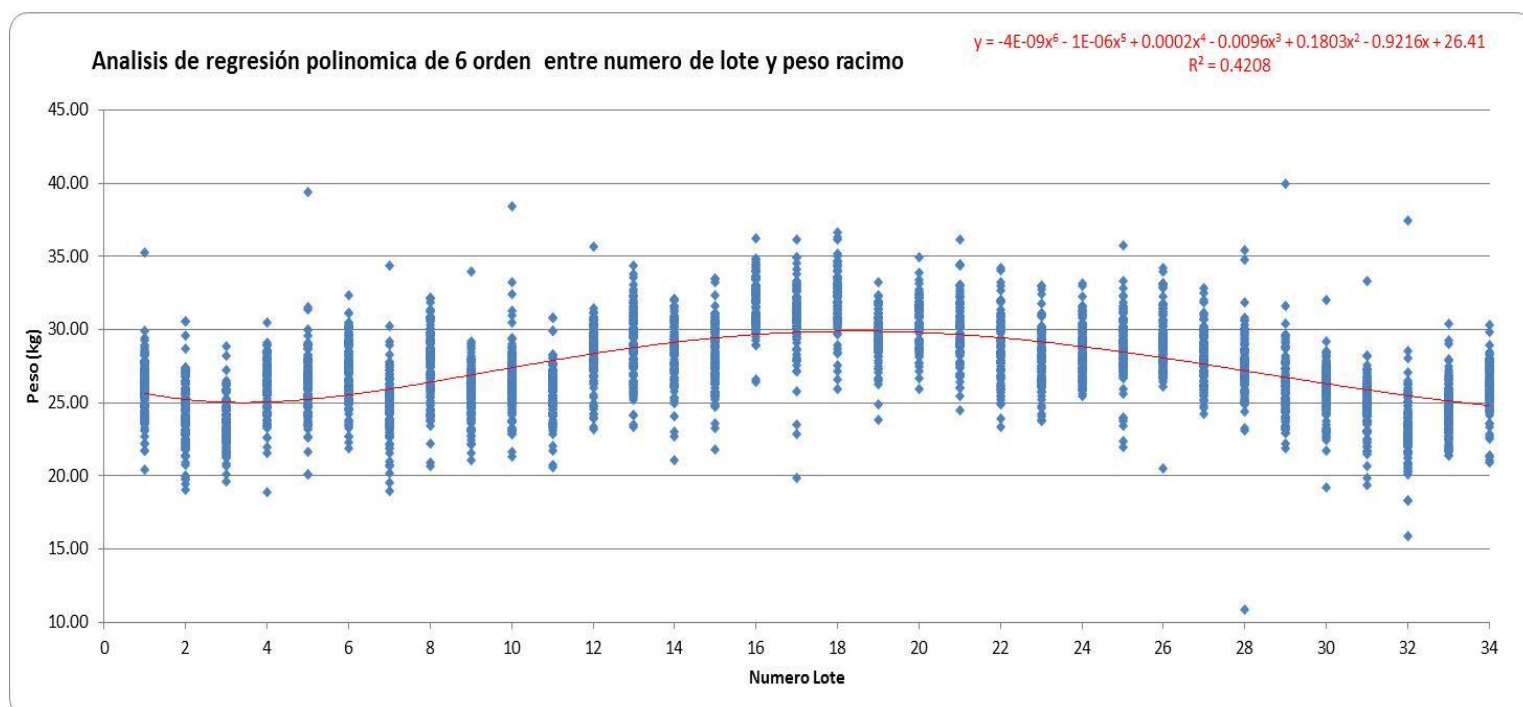


**Figura 14.** Diagrama de dispersión y regresión entre las variables de peso (dependiente) y nivel freático (independiente) en las mismas semanas evaluadas.



**Figura 15.** Diagrama de dispersión y regresión entre las variables de peso (dependiente) y nivel freático (independiente) 13 semanas después del evento del nivel freático.

En el análisis de dispersión de todos los datos evaluados de peso de racimo entre la semana 1 del 2011 a la 12 del 2012, se presenta que los lotes de la finca El Paso que presentan una mejor producción sostenida en el tiempo son del 16 al 22, presentando tendencias cercanas a los 30 kg (alto); los lotes que presentaron una tendencia baja (25 kg) fueron del 1 al 5 y del 31 al 34, los demás lotes presentan una tendencia promedio establecida entre los dos valores mencionados anteriormente (27.5 kg). También se puede decir que aunque se presentó una alta variabilidad, esta no presentó una alta dispersión, ya que el mayor número de eventos estuvieron entre los 20 y 30 kg; los datos que se presentaron por fuera de este rango se debe a que son racimos con pesos que se presentan de forma muy esporádica pero no afecta en si la tendencia de los pesos presentados en los lotes evaluados (ver figura 16).



**Figura 16.** Grafica de dispersión del peso de racimo de la semana 01 del 2011 a la 12 del 2012 por lote.



### **4.3. Metodología aplicada y resultados principales (método gráfico)**

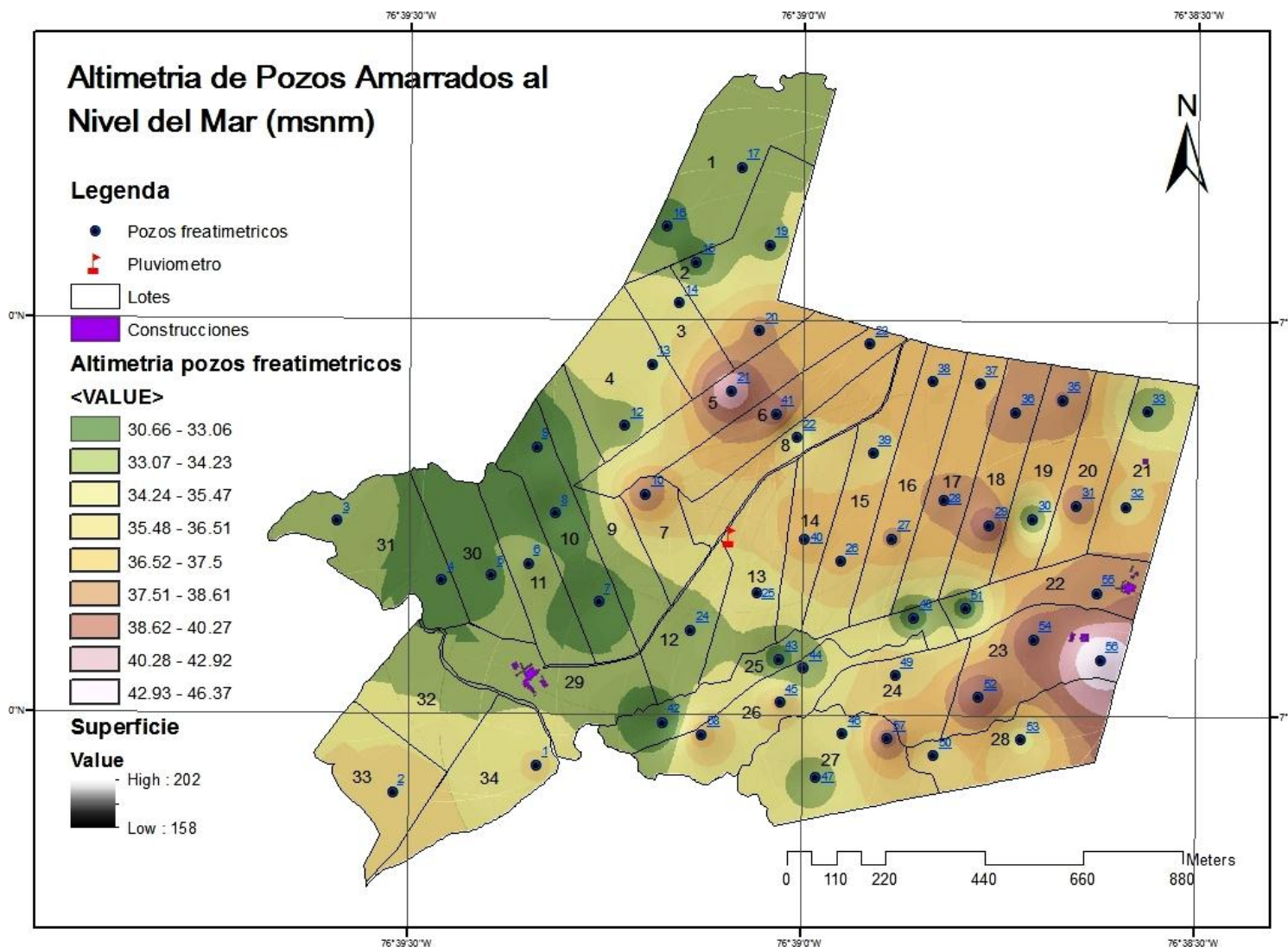
De acuerdo a lo descrito en el punto anterior en donde se detalla la organización de la información, análisis de cada variable y relación que presentan cada una de ellas, se procede a utilizar la representación espacial, con el objetivo de ver desde el punto de vista más preciso y lógico los sitios de la finca afectados por las variables de precipitación y nivel freático.

Para esto, la metodología usada en la variable de nivel freático consistió básicamente en la interpolación de superficies semanales de nivel freático, para representar las isobatas (fluctuación vertical del nivel freático), isohipsas (indica el direccionamiento del flujo de agua freática) y alturas de los pozos sobre el nivel del mar. Estas superficies se produjeron en formato raster (grillas), y con ellas se mapearon las zonas problema que fueron comparadas con el comportamiento tanto de la precipitación y pesos de racimos por lote.

#### ***4.3.1. Interpolación de superficies usando Spatial Analyst (ArcGIS)***

Usando los valores correspondientes a cada uno de los puntos (pozos freáticos), y con el fin de obtener una superficie que describiese el gradiente de cada una de las variables de altimetría, isobatas e isohipsas, se usó el método de interpolación raster de ponderación de distancia inversa (IDW), ya que define muy bien las características evaluadas permitiendo determinar de una manera apropiada los patrones de distribución espacial de la variable de nivel freático, donde, para todas interpolaciones se tomó en un tamaño de celda de 8, poder de 2 y una distancia de 520, esto, se debió al tamaño que tiene la finca El Paso de 203.51 ha. Todas las variables se mapearon usando los rangos presentados en la

tabla 2 y los eventos más impactantes presentados en las semanas muestreadas tanto para peso de racimos y niveles freático (isobatas e isohipsas).



**Figura 17.** Curvas de nivel que reflejan la altimetría que tiene la finca teniendo en cuenta la altura de los pozos freáticos sobre el nivel del mar (msnm).

#### 4.3.1.1. Mapeo de altimetría de pozos

En la interpolación hecha a la altimetría de los pozos (figura 17) y mejorada con la herramienta de superficies Surface Analysis Hillshade, se evidencia de cierta manera la variación superficial del terreno, presentando zonas altas en el área



sureste de la finca, las cuales van bajando hacia el suroeste y noroeste, presentando picos de altura en lugares específicos de los lotes 5, 18 y 27 debido a la irregularidad del terreno; esto de cierta manera coincide muy bien con el relieve de la región, en donde, hacia el este se tiene la serranía del Abibe (ver anexo) y hacia el oeste el mar del Golfo de Urabá.

Estos datos de altimetría de pozos se amararon al nivel del mar, con el objetivo de ver hacia donde corren las aguas internas del suelo (isohipsas) en la finca, la cual se detalla mejor en ítem 4.3.1.3.

#### **4.3.1.2. Mapeo de Isobatas y Peso de racimo por lote**

De acuerdo al análisis hecho en la organización de los datos, donde, se explica los efectos que tiene el nivel freático contra las demás variables evaluadas, se seleccionaron cuatro semanas puntuales que representan muy bien los cuatro trimestres del año donde se ve afectada la producción de la finca (peso de racimo); a estas se les realizó el proceso de interpolación descrito anteriormente, como se muestra en la figura 18. Cabe decir que los datos que se tuvieron para el estudio presentaron una distribución normal, con desviaciones estándar (menos al 22%) aceptables para la agricultura y en especial el cultivo de banano (ver anexos).

En el mapa de isobatas (interpolación de la profundidad del nivel freático) de la semana 1, que representa el primer trimestre del año, el nivel freático se encontraba en un rango superficial de 60 cm respecto a la superficie del suelo (color rojo), esto se debe a que cuando se tiene precipitaciones acumuladas muy altas durante la semana (159 mm) se impacta altamente la profundidad del nivel

freático (ver figura 5); además la precipitación acumulada que se tenía entre la semana 49 del 2010 a la 1 del 2011 fue de 612 mm (ver figura 18); desde el punto de vista espacial en la finca este evento tuvo su mayor impacto (niveles freáticos menores de 50 cm) en los lotes 1, 2, 3, 4, 5, 6, 8, 9, 10, 11, 29, 30, 31, 32, 33 y 34 ubicados en la zona oeste abarcando un área de 96,12 ha equivalente al 47% de la finca, y los lotes menos críticos se encontraban en la parte sureste. Este evento trascendió 13 semanas después, en el peso de los racimos que fueron cosechados desde la semana 13 del 2011, afectando la productividad (nivel bajo) especialmente en los lotes 2, 3, 4, 7, 8, 9, 10, 29, 31, 32 y 33 (ver figura 19) que equivale a 64,52 ha y representan el 32% de la finca.

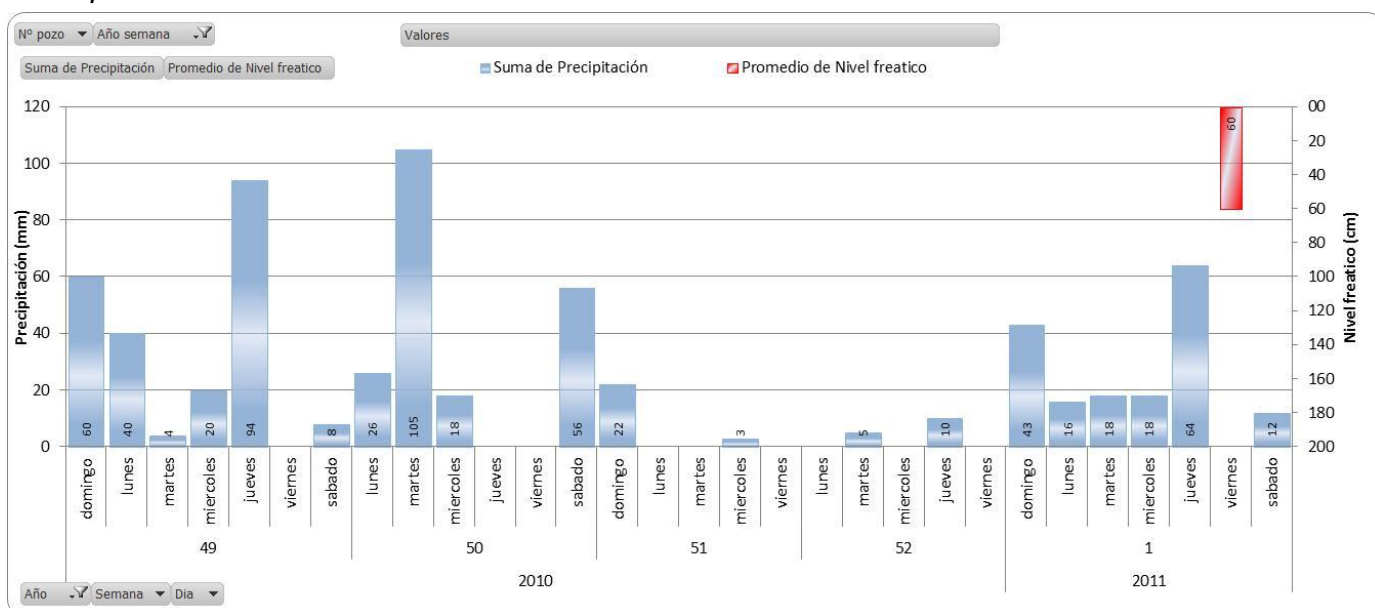
En la interpolación hecha a los datos tomados en la semana 21 que representan el segundo trimestre del año, en este la profundidad del nivel freático se encontraba muy profundo por la baja precipitación presentada (43 mm), además, la precipitación acumulada de la semana 18 a la 21 del 2011 ostento niveles muy bajos (155 mm) como se observa en la figura 18. En la isobata genera para esta fecha se evidencia que las zonas críticas desaparecen en su totalidad, dado que el nivel freático se encuentra por debajo del metro de profundidad (ver figura 19 y tabla 3), así mismo el peso de racimo por lote mejoró sustancialmente, pasando de tener 11 lotes con pesos bajos a ninguno, y solo teniendo los lotes 2, 3, 4, 7, 9, 11, 32 y 33 con peso medio (entre 24 y 28 kg) que equivalen a 51,80 ha (25% de la finca) ver tabla 3.

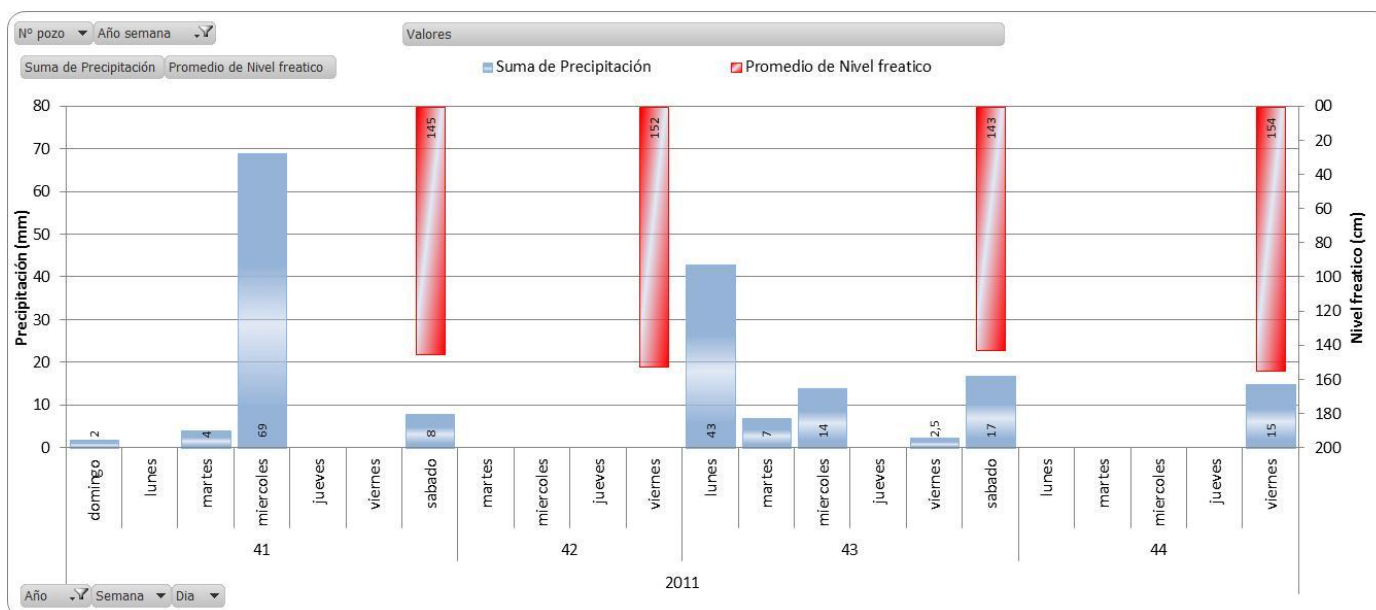
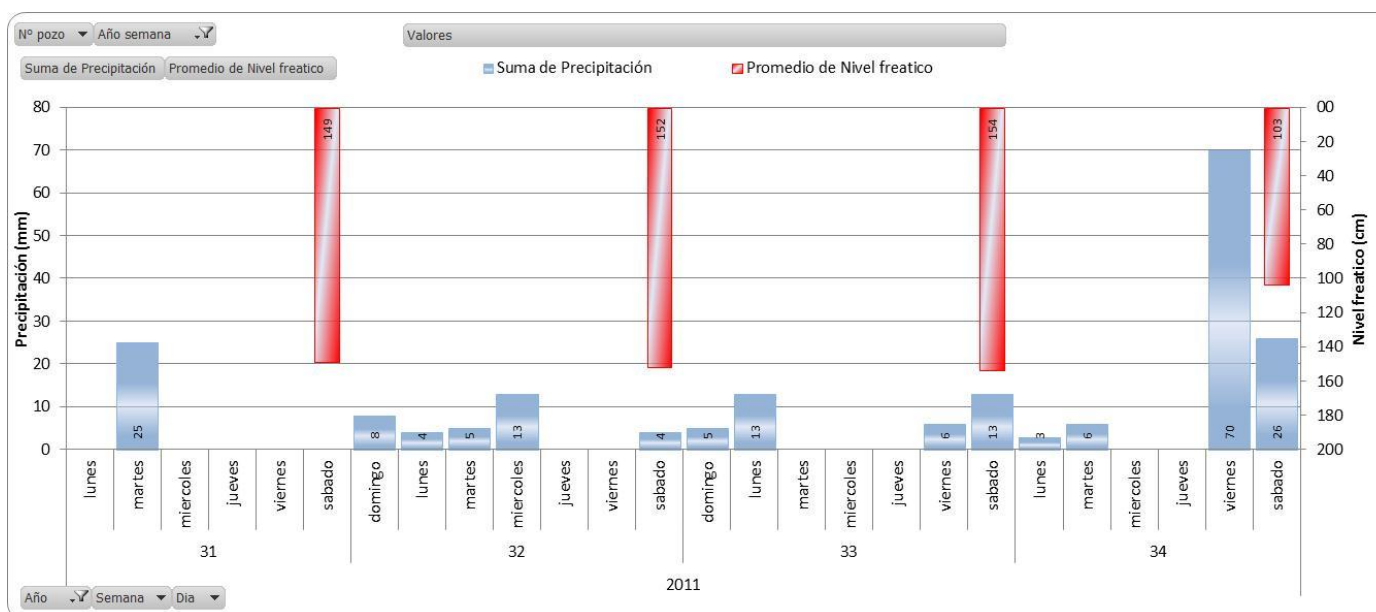
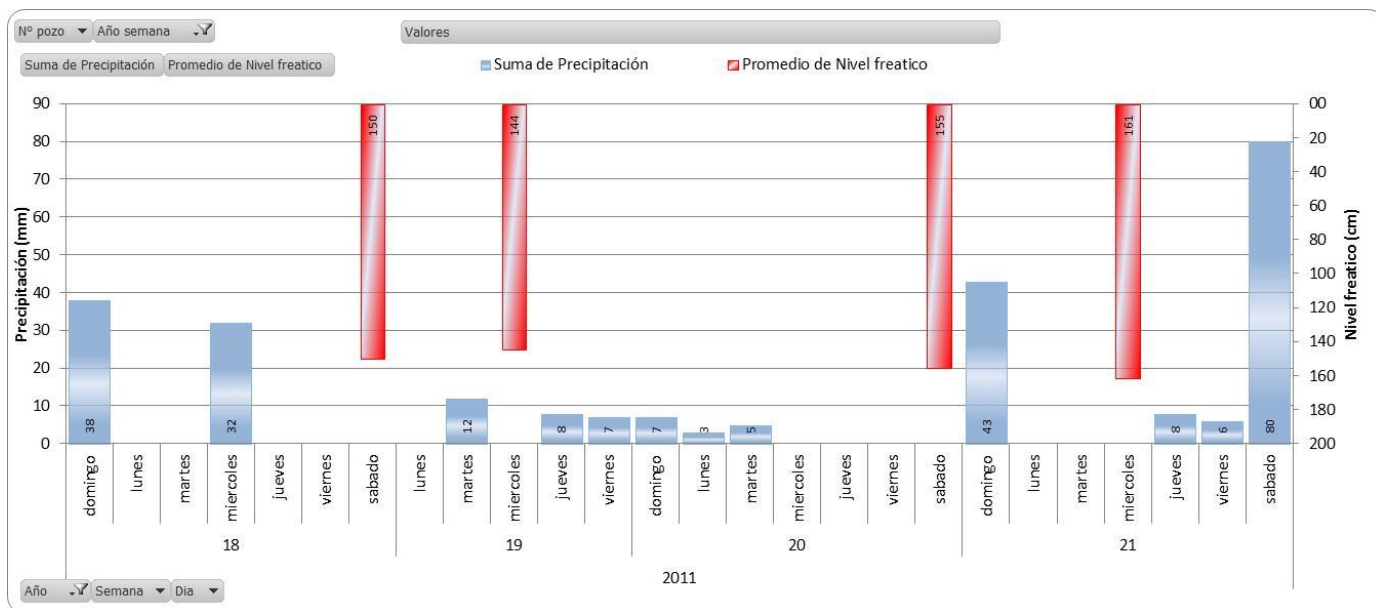
Para el análisis hecho al nivel freático evaluado en la semana 34 (representa en tercer trimestre), se vuelve a evidenciar un comportamiento similar al descrito en la semana 1, pero, está vez menos crítico, ya que la precipitación de la semana

fue menor (105 mm) y la acumulada en las últimas cuatro semanas de 201 mm también (ver figura 18); este evento afectando de forma espacial el nivel freático, ubicándolo en un rango superficial y muy superficial principalmente en los lotes 1, 2, 6, 8, 30, 31, 32 y 33 que constituyen 24,22 ha (12% de la finca); esto represento un efecto bajo en el peso de racimo de la semana 46 en los lotes 1, 2, 3, 7, 10, 29, 31, 32 y 33 que equivale a 57,57ha (28% de la finca) ver tabla 3.

En el análisis de la semana 44 (representa en cuarto trimestre), como en la semana 21, se evidencia un mejoramiento de los niveles freáticos al ubicarse en un nivel profundo y muy profundo, dado que la precipitación presentada en la semana fue de 15 mm, pero en el acumulado de las cuatro últimas semanas fue de 181,5 mm (ver figura 18). En la isobata generada se evidencia que el número de lotes que se encuentran en un nivel freático profundo comparando con la semana 21 es mayor (ver figura 19 y tabla 3), así mismo los lotes que presentaron un peso medio aumento de 8 a 17 (1, 2, 3, 4, 5, 7, 9, 10, 11, 26, 28, 29, 30, 31, 32, 33 y 34), representando un área de 107,05 ha (52% de la finca) ver tabla 3.

**Figura 18.** Graficas de precipitación cuatro semanas atrás de las semanas seleccionadas para hacer los análisis isobatas en cada trimestre del año.





En la interpolación hecha al promedio de las 64 semanas de la profundidad del nivel freático se evidencio que en la finca tiene condiciones que no afectan mucho el desarrollo del cultivo, ya que se mantiene entre los rangos de moderadamente profundo y muy profundo (ver figura 19 y tabla 3), que comparado con el promedio de los pesos por lote de las 64 semanas, no se tiene mucha relación, ya que todos los lotes no presentan las mismas condiciones de productividad; donde los lotes que presentan un mejor nivel freático (muy profundo) están ubicados en la zona sur (12, 22 al 29 y 34) y los lotes que presentaron un mejor peso (alto) son los ubicados al este (lotes 12 al 27); claro está que los lotes que han presentado los mayores inconvenientes de peso (muy bajos a medios) en los semanas evaluadas de cada trimestre son siempre los mismos, presentando una relación muy acertada entre el peso de racimo y el nivel freático (ver figura 19).

Todo lo anterior tiene alta relación con la infraestructura de drenaje; ya que los lotes menos afectados tienen un sistema de drenajes terciario más denso y organizado, así mismo su altimetría es más alta que la del resto de la finca

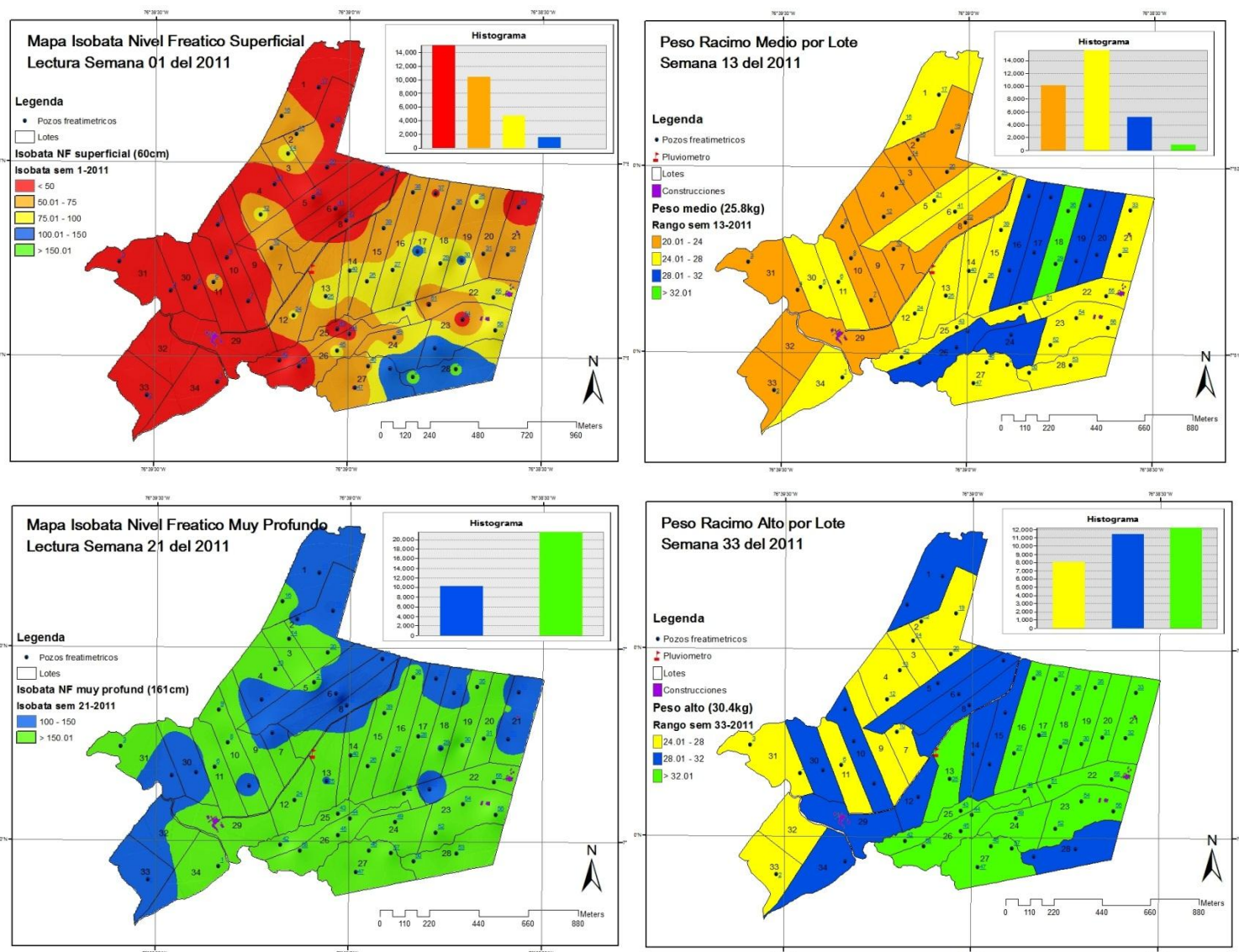
**Tabla 3.** Cuantificación de las áreas de acuerdo a los rangos establecidos para el nivel freático y peso de racimo, en las semanas analizadas

Rango Nivel Freático (cm)	Valoración	Color del rango	Área sem 1		Área sem 21		Área sem 34		Área sem 44		Área promedio	
			Ha	%	Ha	%	Ha	%	Ha	%	Ha	%
< 50	Muy superficial	Rojo	96,12	47%	0,00	0%	0,40	0%	0,00	0%	0,00	0%
50 - 75	Superficial	Naranja	66,58	33%	0,00	0%	23,82	12%	0,00	0%	0,00	0%
75 - 100	Moderadamente profundo	Amarillo	30,44	15%	0,00	0%	96,37	47%	0,04	0%	0,64	0%
100 - 150	Profundo	Azul	10,66	5%	66,60	33%	77,82	38%	111,31	54%	138,13	68%
> 150	Muy profundo	Verde	0,60	0%	137,79	67%	5,98	3%	93,04	46%	65,62	32%
Total			204,39	100%	204,39	100%	204,39	100%	204,39	100%	204,39	100%

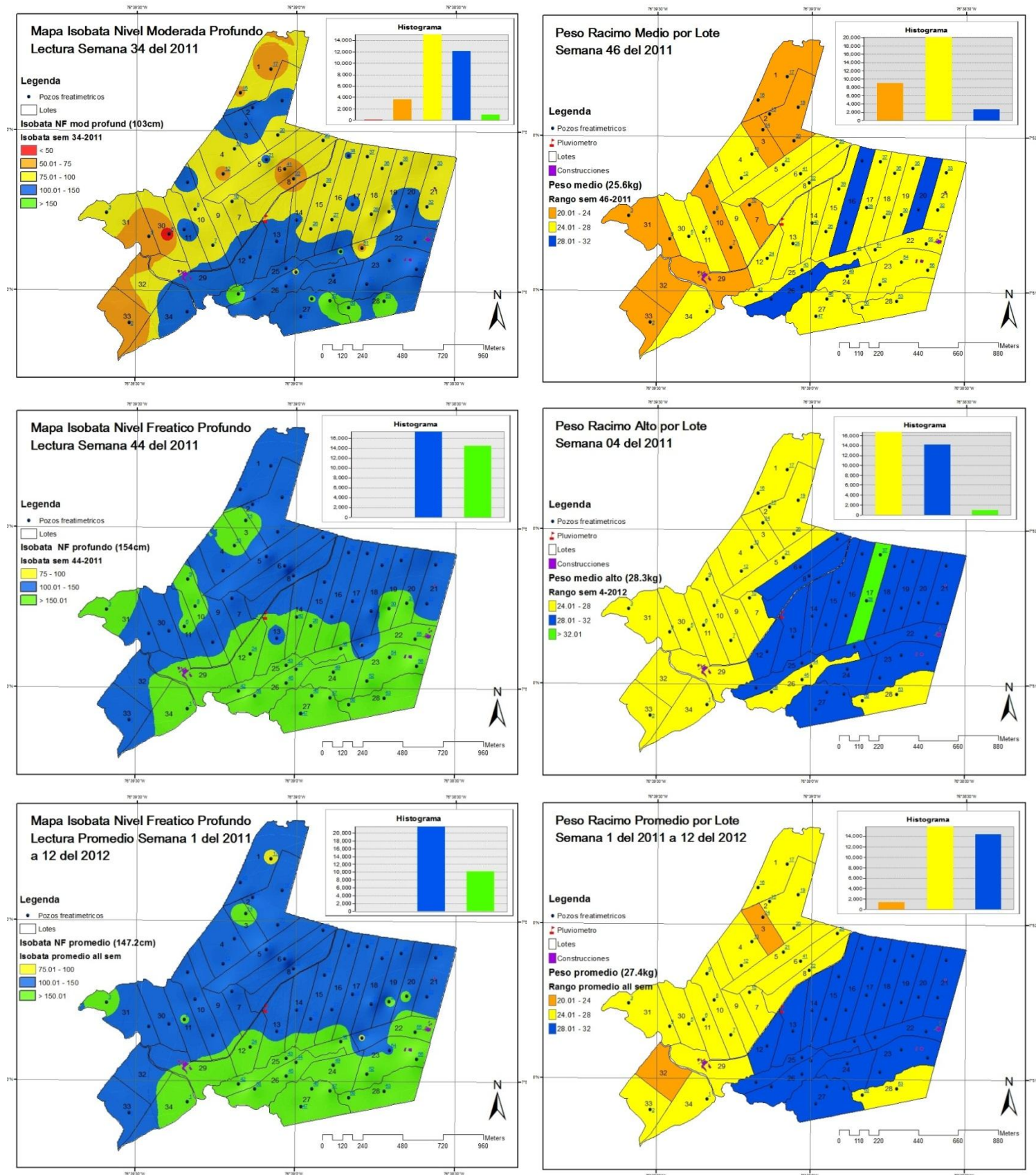
Rango Peso (kg)	Valoración	Color del rango	Área sem 13		Área sem 33		Área sem 46		Área sem 04		Área promedio	
			Ha	%	Ha	%	Ha	%	Ha	%	Ha	%
< 20	Muy bajo	Rojo	0,00	0%	0,00	0%	0,00	0%	0,00	0%	0,00	0%
20 - 24	Bajo	Naranja	64,52	32%	0,00	0%	57,57	28%	0,00	0%	9,20	5%
24 - 28	Medio	Amarillo	99,94	49%	51,80	25%	128,53	63%	107,05	53%	101,56	50%
28 - 32	Alto	Azul	33,44	16%	73,40	36%	17,43	9%	90,52	44%	92,76	46%
> 32	Muy Alto	Verde	5,63	3%	78,32	38%	0,00	0%	5,95	3%	0,00	0%
Total			203,53	100%	203,53	100%	203,53	100%	203,53	100%	203,53	100%

### 4.3.1.3. Mapeo de Isohipsas

Utilizando los amarres hechos a los pozos de observación respecto al nivel del mar, se realizaron interpolaciones a las mismas semanas evaluadas en las Isobatas (semanas 1, 21, 34 y 44 del 2011), generando así los mapas de isohipsas, los cuales nos indican por curvas de nivel la dirección en la cual se mueve el agua freática a través de la finca.



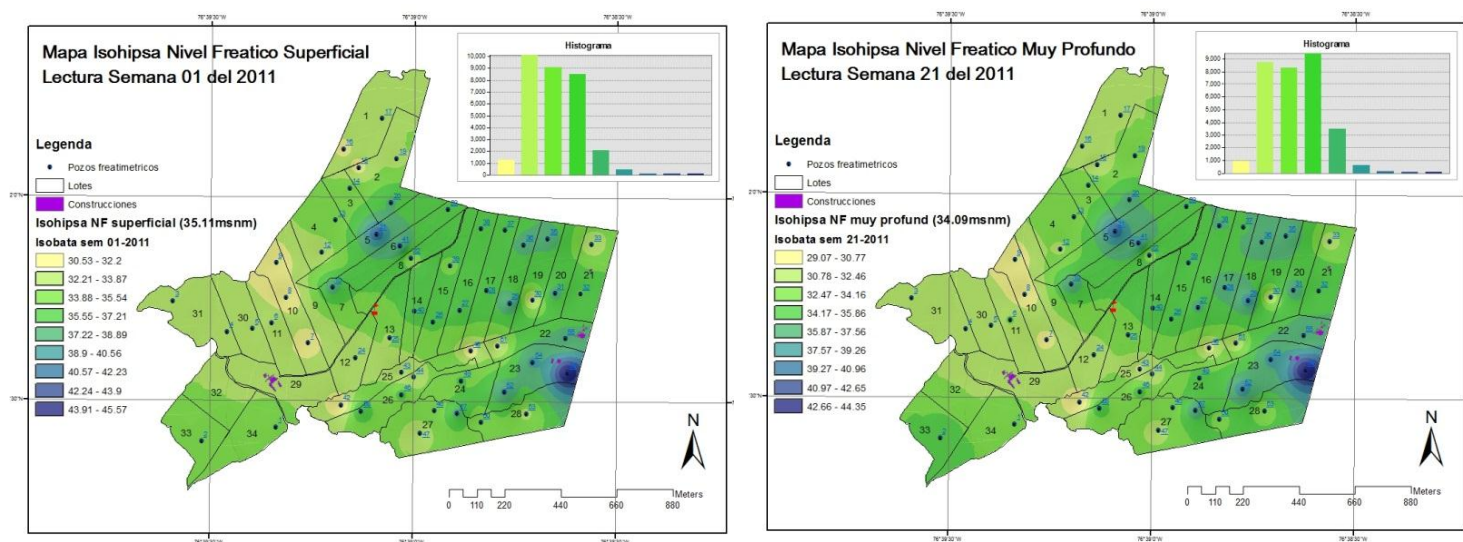




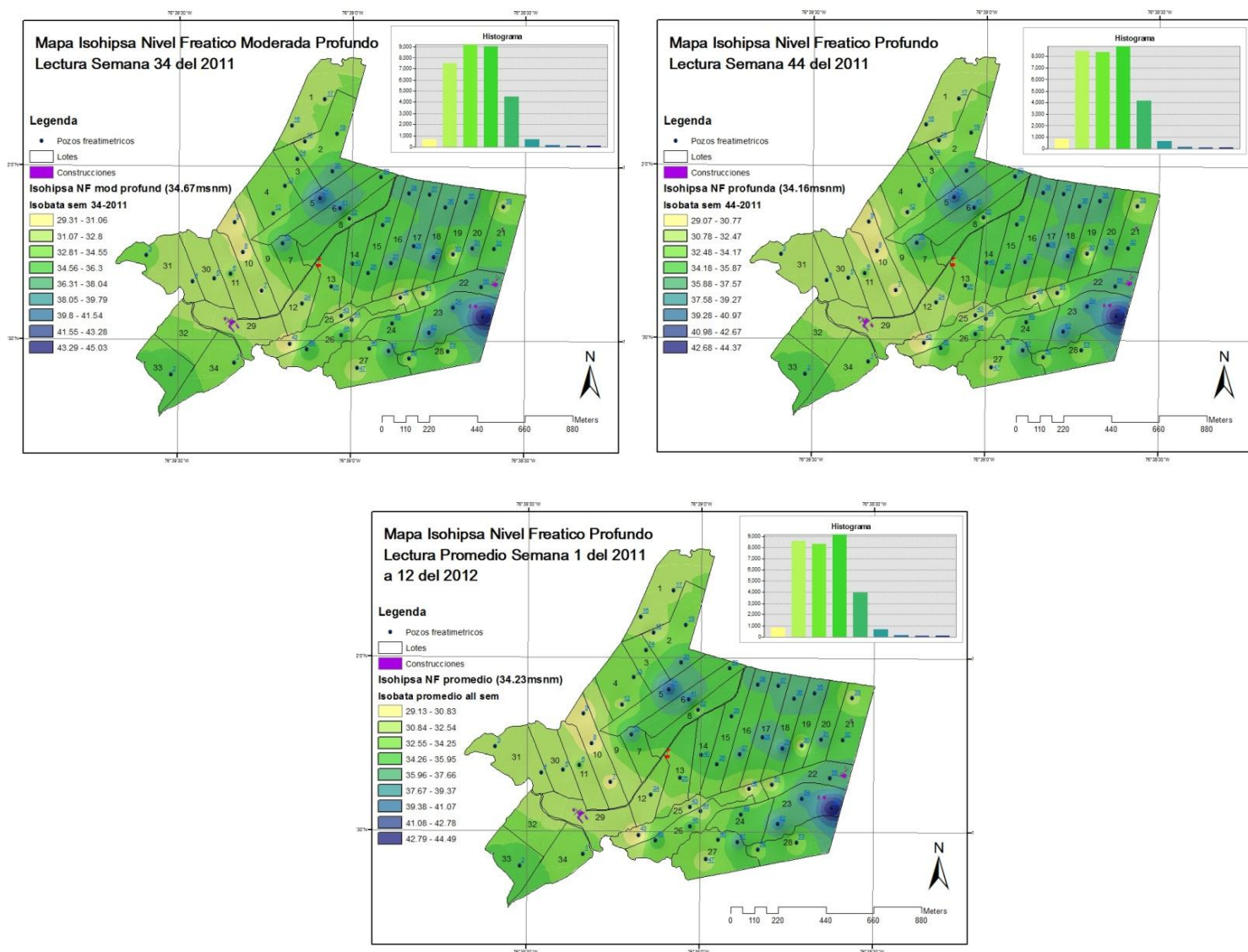
**Figura 19.** Mapas isobatas de nivel freático (izquierda) y peso de racimo por lote (derecha) finca El Paso, en semanas donde se presentan los eventos más representativos del estudio.

En la figura 20 se puede observar que todas las semanas analizadas incluyendo el promedio, presentan la misma tendencia, aun si la profundidad del nivel freático se encuentra en un rango muy superficial caso semana 1 o profundo caso semana 21. De forma espacial el movimiento de las aguas son presentan de este a oeste, teniendo en cuenta que en su trayecto y por la superficie irregular del terreno se tiene picos de elevación, donde, hay pozos freáticos que se encuentran a mayor (pozos 10, 21, 29, 41, 52, 54, 56 y 57) y menor altura (pozos 7, 8, 9, 42 48) sin afectar de forma significativa su tendencia hacia el oeste.

Por lo evidenciado anteriormente se realizó un análisis al diseño del sistema de drenajes de la finca vs la tendencia o dirección de las aguas (ver figura 21), resultando que de acuerdo a lo expresado por Sierra (1994) los drenajes terciarios no están cumpliendo a cabalidad su misión ya que estos no se encuentran cortando las aguas, trabajo que hacen los drenes secundarios de la finca.

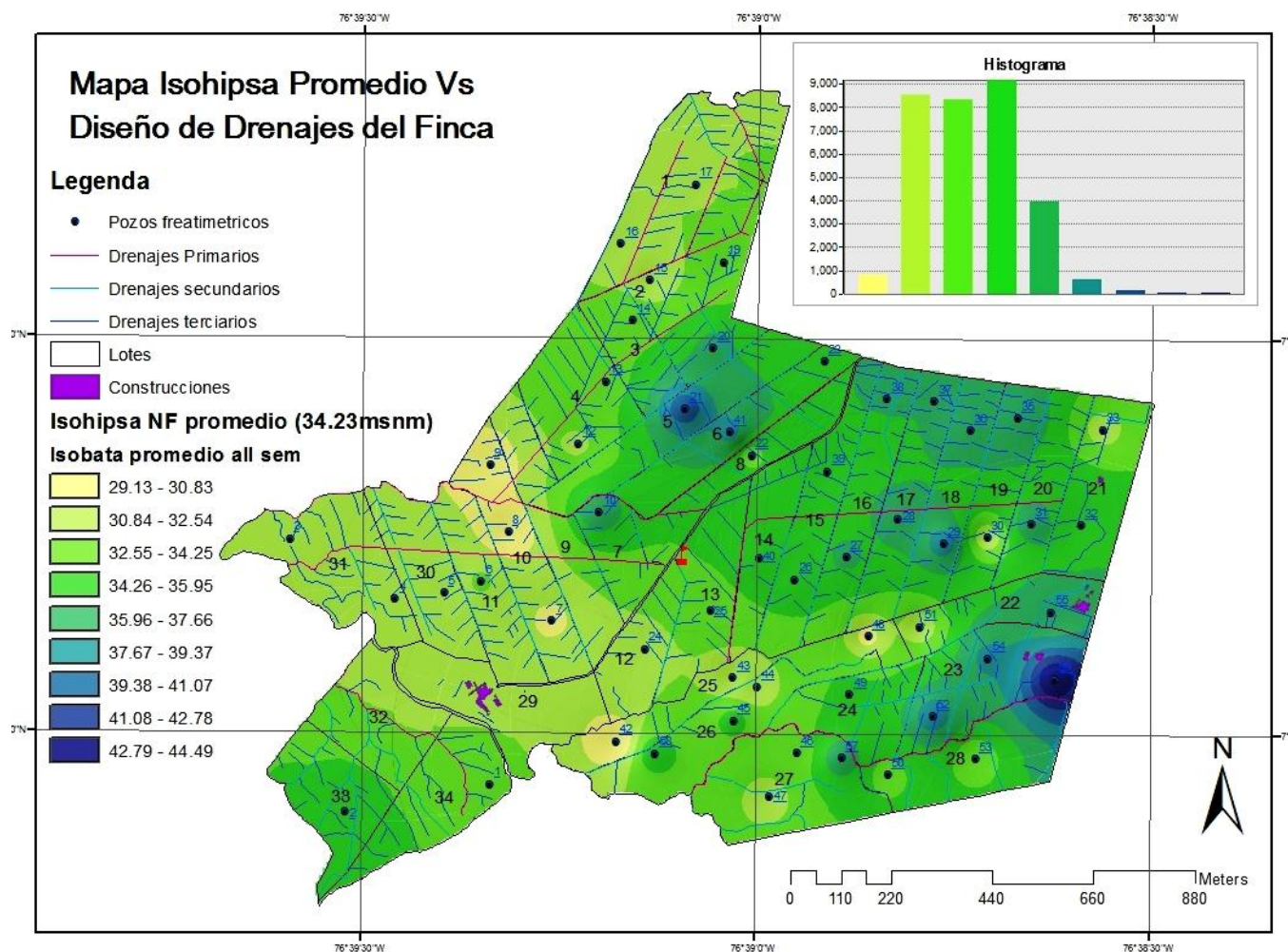






**Figura 20.** Mapas de Isohipsas que reflejan el comportamiento de las aguas subterráneas en la finca El Paso, en épocas donde son más representativos los cambios del nivel freático (semanas 1, 21, 34 y 44 del 2011).

Esta información es importante ya que ayuda a mejorar el sistema de drenajes que tiene la finca y a enfocar los esfuerzos o trabajos que eviten que en épocas críticas de precipitación se suban las tablas de agua a niveles críticos y afecten la futura producción de las plantaciones en los lotes denominados como críticos.



**Figura 21.** Mapa de Isohipsas promedio de todas las semanas evaluadas que reflejan el comportamiento de las aguas subterráneas vs el diseño de drenajes de la finca El Paso.

#### 4.3.2. Mapeo de zonas aptas para el cultivo bajo la herramienta de superposición

Utilizando la herramienta de superposición ponderada (Weighted Overlay) del Spatial Analyst en el ArcGIS 10, se tomaron las semanas evaluadas anteriormente de isobatas y pesos de racimo de cada uno de los trimestres para ser superpuestos sus raster resultantes, y categorizarlos de acuerdo a la aptitud definida para el cultivo de banano.

Para realizar dicho análisis fue necesario hacer procesos previos, los cuales consistieron en:

- Transformar los archivos de pesos racimo de vector a raster utilizando la herramienta Poligon to Raster del Conversion Tools teniendo en cuenta el tamaño de celda anteriormente usado en las interpolaciones de niveles freáticos (Cellsize 8).
- Luego se tomaron los raster de peso de racimo e isobatas (interpolación) y se reclasificaron según los rangos descritos en la tabla 2 en la herramienta Reclassify del Spatial Analyst Tools definiendo los mismos tamaños de celda (Cellsize 8).

Hecho todo lo anterior se ingresaron los raster en parejas teniendo en cuenta que la semana de la isobata explicara la de peso de racimo (ejemplo semana 1 isobatas vs semana 13 peso racimo) en la herramienta Weighted Overlay del Spatial Analyst Tools, utilizando la secuencia representada en la tabla 4. En esta secuencia se le asignaron los valores establecidos en la tabla 2 para la aptitud de producción de banano; es importante definir que para el comparativo se le asignó un peso igual para ambas variables evaluadas (% de influencia).

**Tabla 4.** Cuantificación de las áreas de acuerdo a los rangos establecidos para el nivel freático y peso de racimo, en las semanas analizadas, y asignación de los valores establecidos para cada variable teniendo en cuenta una igualdad de porcentajes.

**Tabla superposición ponderada primer trimestre**

Raster	% influencia	Filed	Scale Valué
Reclass Isobata sem 1	50%	Valué	Asignado
		1	1
		2	2
		3	3
		4	4
Reclass Peso racimo sem 13	50%	Valué	Asignado
		2	2
		3	3
		4	4
		5	5

**Tabla superposición ponderada segundo trimestre**

Raster	% influencia	Filed	Scale Valué
Reclass Isobata sem 21	50%	Valué	Asignado
		4	4
		5	5
Reclass Peso racimo sem 33	50%	Valué	Asignado
		3	3
		4	4
		5	5

**Tabla superposición ponderada tercer trimestre**

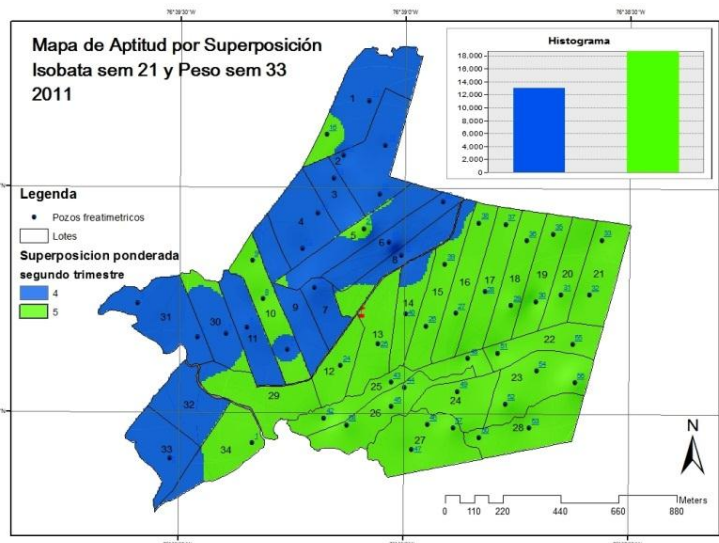
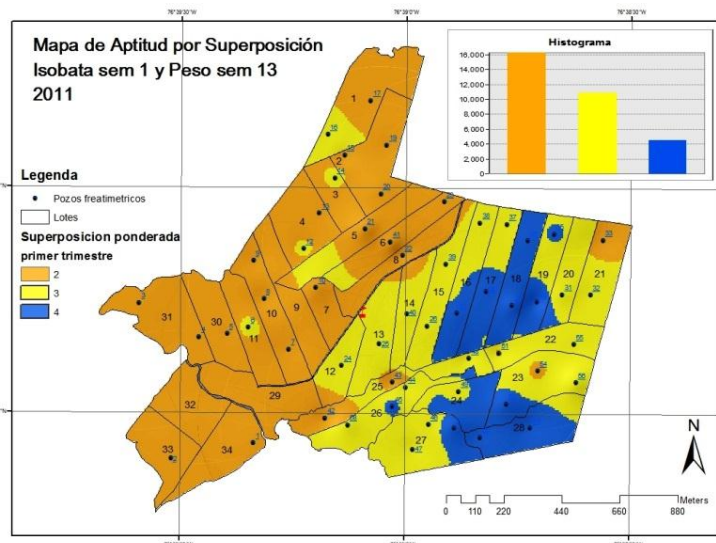
Raster	% influencia	Filed	Scale Valué
Reclass Isobata sem 34	50%	Valué	Asignado
		1	1
		2	2
		3	3
		4	4
Reclass Peso racimo sem 46	50%	Valué	Asignado
		2	2
		3	3
		4	4

**Tabla superposición ponderada cuarto trimestre**

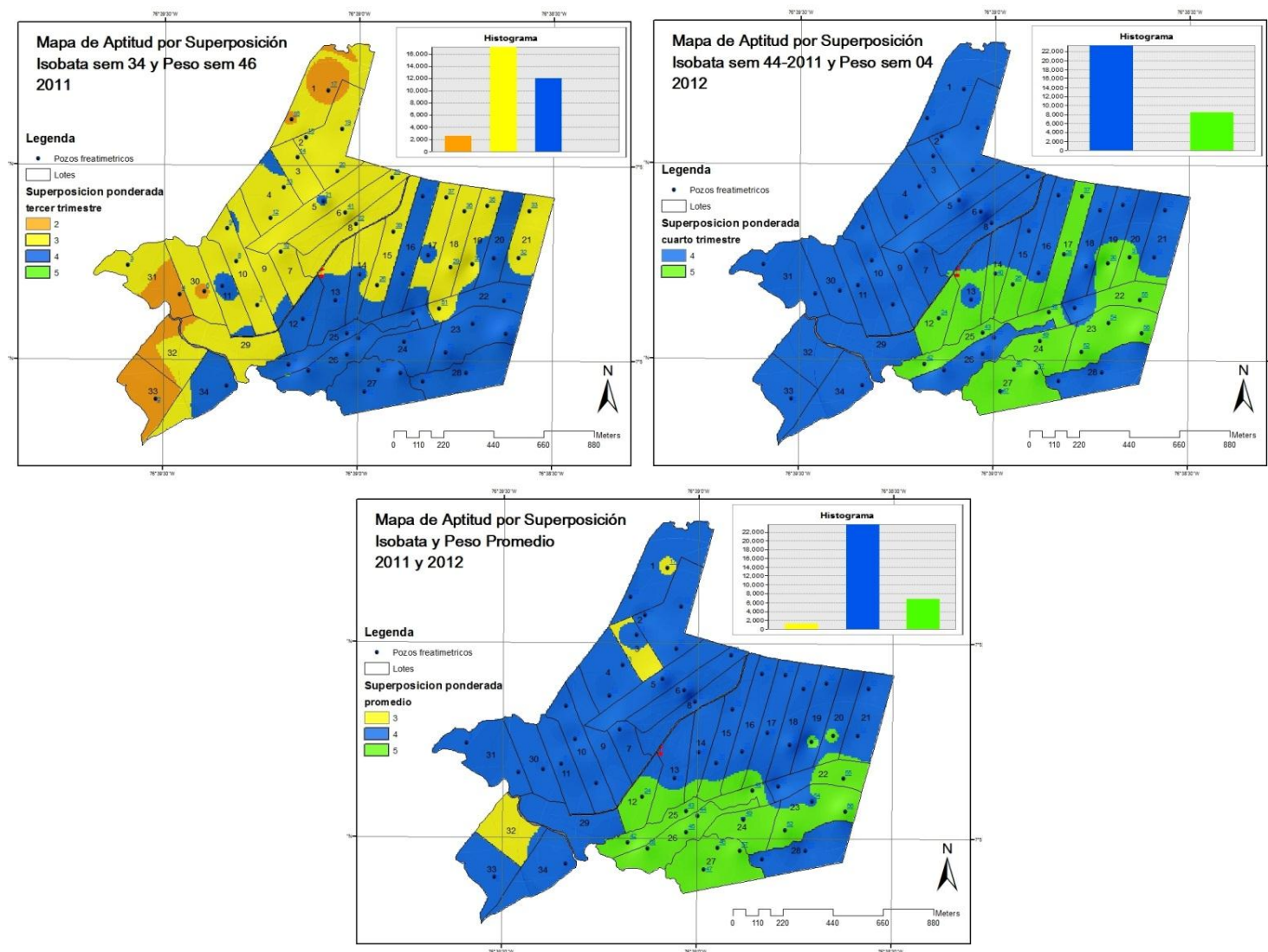
Raster	% influencia	Filed	Scale Valué
Reclass Isobata sem 44	50%	Valué	Asignado
		3	3
		4	4
		5	5
Reclass Peso racimo sem 04	50%	Valué	Asignado
		3	3
		4	4
		5	5

**Tabla superposición ponderada promedio año 2011 y 2012**

Raster	% influencia	Filed	Scale Valué
Reclass Isobata promedio semanas 1 - 2011 a 2 - 2012	50%	Valué	Asignado
		3	3
		4	4
Reclass Peso racimo promedio semanas 1 - 2011 a 2 - 2012	50%	Valué	Asignado
		2	2
		3	3
		4	4







**Figura 22.** Mapa aptitud de áreas por superposición de isobatas y pesos de racimos en cada trimestre del año y el promedio de todas las semanas evaluadas.

El resultado de la herramienta de superposición ponderada se representa en la figura 22, donde se muestran según la escala estipulada en la tabla 2 las áreas de mejor aptitud de producción de banano en la finca El Paso en cada trimestre y promedio en general de las 64 semanas evaluadas.

El primer trimestre donde se presentaron los niveles freáticos más superficiales y menores pesos de racimo, es decir, los factores más limitantes, se ratifica que los

lotes de menor aptitud para la producción de banano (malo) son del 1 al 11 y 29 al 34 (ver figura 22) representando un 51% de la finca (ver tabla 5).

En el segundo trimestre evaluado donde se presentaron las mejores condiciones para producción de banano solo los lotes 1 al 9, 11, 30, 31, 32 y 34 presentaron una aptitud buena, el reto se encontraba en un nivel muy bueno representando el 59% de la finca (ver figura 22 y tabla 5).

En tercer trimestre se ratifica aún más lo evidenciado en el primer trimestre, donde nuevamente los lotes 1, 33 y parte del 30 al 32 presentan una mala aptitud para producción de banano (ver figura 22 y tabla 5).

En el cuarto trimestre se confirma también lo descrito en el segundo trimestre, donde, nuevamente los mejores lotes son el 12, 17, 22 al 25 y 27 representando un 26% de la finca (ver tabla 5).

Para sacar una conclusión más acertada se realizó este mismo trabajo al promedio de todas las semanas evaluadas (desde la semana 1 del 2011 a la 12 del 2012), observando que los lotes que presentan la aptitud más negativa (regular) de la finca son el 32 y parte del 1 y 3, que representan 8,05 ha (4% de la finca), estos sitios son los que necesitan una mayor atención, ya que son los que en términos viabilidad no permiten expresar todo el potencial de la finca como si lo hacen los lotes 23 al 27 y parte del 12 y 22 (muy bueno) que representan un 22% de la finca.

Es de tener en cuenta que las áreas más críticas de la finca se ubican en el oeste, donde llegan todas las aguas freáticas como lo presenta la figura 21, este factor influye altamente, además que son las partes más bajas de la finca (ver figura 17).

Con todo lo descrito anteriormente en la finca es importante hacer a corto y mediano plazo una la adecuación de drenajes que ayude a disminuir los efectos adversos que se tienen y a largo plazo un programa de renovaciones donde se estipule un cambio en el diseño actual de drenajes, ya que los que actualmente se tiene no cumplen las funciones

**Tabla 5.** Cuantificación de las áreas de acuerdo a los rangos establecidos para la aptitud de producción de banano

Rango Aptitud Produc Banano	Valoración	Color del rango	1er trimestre		2do trimestre		3er trimestre		4to trimestre		Área promedio	
			Ha	%	Ha	%	Ha	%	Ha	%	Ha	%
1	Muy malo	Rojo	0,00	0%	0,00	0%	0,00	0%	0,00	0%	0,00	0%
2	Malo	Naranja	104,51	51%	0,00	0%	16,77	8%	0,00	0%	0,00	0%
3	Regular	Amarillo	70,12	34%	0,00	0%	109,68	54%	0,00	0%	8,05	4%
4	Bueno	Azul	28,90	14%	83,54	41%	77,04	38%	149,65	74%	151,55	74%
5	Muy bueno	Verde	0,00	0%	119,99	59%	0,03	0%	53,88	26%	43,92	22%
Total			203,53	100%	203,53	100%	203,53	100%	203,53	100%	203,53	100%

## 5. Conclusiones

Como **conclusiones** de los temas desarrollados anteriormente se tiene que:

La conceptualización plasmada en la metodología, es acorde para la evaluación de las variables estudiadas de precipitación, nivel freático y peso de racimo.

La infraestructura que tiene la finca, en cuanto a pluviómetro, red de pozos freáticos y distribución de lotes es adecuada, ya que se logran identificar muy bien las áreas o sitios problemáticos.

La organización de los datos a nivel semanal es adecuada para la realización de los análisis previos a cada una de las variables evaluadas.

El análisis de regresión hecho a la precipitación y nivel freático indican una fuerte correlación positiva en la misma semana evaluada, así mismo el nivel freático y el peso de racimo presentan la mayor correlación a las 13 semanas.

En el año se presentan cuatro eventos críticos en la precipitación y el nivel freático que impactan directamente en la productividad del banano de forma espacio temporal, estos se marcan de forma trimestral (15,5 semanas); donde en el primer y tercer trimestre se reducen a un nivel medio bajo los pesos de racimos, y en el segundo y cuarto trimestre se aumenta a un nivel medio alto.

La herramienta de interpolación del Spatial Analyst en ArcGIS por ponderación inversa (IDW) y bajo los criterios descritos en la metodología genera adecuadamente los mapas de altimetría, isobatas e isohipsas, necesarios para analizar la variabilidad espacio temporal de los datos recolectados en cada pozo freático ubicados en la finca.



La finca El Paso presenta una pendiente natural (superficie) que va desde el este hacia el oeste, coincidiendo con la macro geografía de la región. Esta misma tendencia presentan las aguas freáticas como se observan en los mapas de isohipsas.

Por lo descrito anteriormente de hacia donde se mueven las aguas y al diseño de drenajes de la finca, se concluye que este sistema de drenajes no se encuentra haciendo la función estipulada, ya que los canales que están cortando las aguas son los secundarios y no los terciarios como lo describen algunos autores citados.

De acuerdo a los mapas de isobatas (interpolaciones) las zonas de la finca que más se ven afectadas por los niveles freáticos están ubicadas en el oeste, esto ya sea en épocas donde el agua se encuentre de forma superficial o profunda.

Con el uso de la herramienta de superposición ponderada del Spatial Analyst se pudo definir que las áreas más críticas de la finca que se deben intervenir a un corto plazo están ubicadas en los lotes 1, 3 y 32, y mediano y largo plazo los lotes 1 al 9 y 29 al 34.

## 6. Recomendaciones

Como **recomendaciones** a estudios posteriores se tiene que:

Es importante hacer una relación a futuro del sistema freático (profundidad del nivel freático) con la cobertura del suelo y su manejo.

Como parte del análisis realizado, se provee una superficie de incertidumbre basada en la densidad de los puntos de muestreo (el óptimo o máximo número de puntos disponibles); estas se presentan en las áreas donde menos presencia se tiene de pozos (un radio de más de 350 metros alrededor de cada pozo freaticométrico, lo que aumenta la probabilidad de error.

Se insta a una expansión en la colecta de información de campo, incluyendo el entrenamiento de personal de fincas para la correcta colecta de la información, incluyendo la georeferenciación de puntos de toma de datos, que resultan siendo fundamentales cuando se tratan de realizar análisis geográficos. Todo esto, incrementará la disponibilidad de la información y a la postre, mejorará los procesos de toma de decisiones en campo.

Hacer usos de diferentes medios de información existentes en internet o empresas gubernamentales que permitan tener modelos de predicción del clima en la región como son el IDEAM o Modelos de Circulación Global (GCM por sus siglas en inglés), Worldclim, entre otros; y así modelar los trabajos a realizar a futuro antes de que ocurran eventos de precipitación como los ocurridos a finales del año 2010 y principios del 2011.

## 7. Bibliografía

- UNIGIS. 2010; Módulos 1 al 4 de especialización SIG
- J. Ramírez, J. Guerrero y A, Jarvis. 2010; Determinación del nivel freático histórico a través de la zona bananera de Urabá para establecimiento de mejor criterio para diseño de sistemas de drenajes
- E. Jobbágy, G. Sznaider, M. Noretto, R. Aragón, G. Mangas y S. Forteza. 2007 Dinámica de napas y riesgo de inundación: Influencias y efectos en la variabilidad de los cultivos. <http://gea.unsl.edu.ar/pdfs/JOBBAGY%20et%20al%202007%20-%20Mundo%20agro.pdf>. Accessed Ene 15, 2011
- L. Avilan R, L. Meneses, R. Sucre, C. Orta y O. Sangle. 1980 Distribución del sistema radical del banano "pigneo gigante" bajo cuatro sistemas de manejo de suelos. [http://www.ipni.net/ppiweb/ltamn.nsf/87cb8a98bf72572b8525693e0053ea70/4d2632349089a7d68525713f00534e89/\\$FILE/Manejo%20por%20Sitio%20Especifico.pdf](http://www.ipni.net/ppiweb/ltamn.nsf/87cb8a98bf72572b8525693e0053ea70/4d2632349089a7d68525713f00534e89/$FILE/Manejo%20por%20Sitio%20Especifico.pdf). Accessed Ene 20, 2011
- [http://www.trimble.com/geoxt3000\\_ts.asp?Nav=collection-38629](http://www.trimble.com/geoxt3000_ts.asp?Nav=collection-38629). Accessed May 1, 2012
- CORBANA (Corporación Bananera Nacional, CR). 2006. Sistema de información geográfica: su utilización en el cultivo de banano (en línea). San José, CR. Consultado 30 Jul. 2006. Disponible en <http://www.corbana.co.cr/cab.shtml> en la sección de productores.
- Espinosa J.; Mite F.; Cedeño S.; Barriga S.; Andino J. 2005. Manejo por sitio específico del cacao basado en sistemas de información geográfica (en línea). Quito, EC, INPOFOS. Consultado 23 may. 2006. Disponible en [www.inpofos.org/ppiweb/ltamn.nsf](http://www.inpofos.org/ppiweb/ltamn.nsf)
- Spaans, E.; Leonidas, E. 2004. Sense and non-sense of satellite navigation for precision agriculture in the tropics. *European Journal of Navigation* 2(3):71-76.
- Suárez Castillo, D.; Valdivia Zelaya, P. 2002. Agricultura de precisión en banano en la empresa agro comercial: el siguiente paso. Proyecto de graduación Lic. Ing. Agr. Guácimo, CR, Universidad EARTH. 48 p.
- Tijerino Picado, J.M.; Bizonhin López, C. 2002. Agricultura de precisión en banano (Musa AAA); una herramienta para la toma de decisiones acertadas. Proyecto de graduación Lic. Ing. Agr. Guácimo, CR, Universidad EARTH. 52p.
- AIDÁROV, P. et. al. 1984. El riego. Editorial MIR. Moscú - URSS. Trad Ar. González. La Habana Cuba.
- BELALCÁZAR, S 1991. El cultivo del plátano en el trópico. Editorial FERIVA. Colombia. p 75

- COLINA, S DE LA. 1997. "Diseño y manejo de sistemas de drenaje", In memoria del Simposio Internacional sobre Riego y Drenaje en Banano. Las Mercedes de Guácimo. Limón - CR. pp. 19-22.
- GRASSI, C. 1991. Drenaje de tierras agrícolas. Centro Interamericano de Desarrollo Integral de Aguas y Tierras. Mérida - Ve. pp 121 -196 y 299 - 300
- ILRI (INTERNATIONAL INSTITUTE FOR LAND AND RECLAMATION AND IMPROVEMENT, Ho). 1978. Principios y aplicaciones del drenaje; Teorías del drenaje agrícola y de la escorrentía. Wageningen - Ho. Vol II. pp. 3, 5, 21, 22 y 281.
- ILRI (INTERNATIONAL INSTITUTE FOR LAND AND RECLAMATION AND IMPROVEMENT, Ho). 1978. Principios y aplicaciones del drenaje. Estudio e investigaciones. Wageningen - Ho. Vol. III pp 51 - 55
- ILRI (INTERNATIONAL INSTITUTE FOR LAND AND RECLAMATION AND IMPROVEMENT, Ho). 1978. Principios y aplicaciones del drenaje. Diseño y manejo de sistemas de drenaje. Wageningen - Ho. Vol. IV pp.6 y 7.
- LINSLEY, R. y FRANZINI, J. 1967. Ingeniería de los recursos hidráulicos. Continental. México - Mx. pp 152-153
- LINSLEY, R. et. al. 1977. Hidrología para ingenieros. McGraw-Hill. Bogotá – Co p 217
- SIERRA, L. 1994. El cultivo del Banano, Producción y Comercio. Medellín Co. pp 203, 210.
- SOTO, M. 1994. El cultivo del Banano, Producción y Comercialización: Planteamiento de una empresa bananera, San José - CR. pp 165 - 172
- SOTO, M. 2008. El cultivo del Banano, Producción y Comercialización: Planteamiento de una empresa bananera. In Congreso Acorban (Guayaquil - Ec). Bananos: Memoria Acorban (1 CD-Rom). pp 330-356. Formato PDF
- VALVERDE, E. 1998. Riego y drenaje. Mimeografiado. EUNED. C Rica.
- Dadzie, BK; Orchard, JE. 1997. Evaluación rutinaria poscosecha de híbridos de bananos y plátanos: criterios y métodos. Guías técnicas INIBAP 2. Montpellier, Fr. 63 p.
- Champion, J. 1961. Indications préliminaires sur la croissance du bananier "poyo". Fruits 16(4):191-194.
- Champion, J; Olivier, P. 1961. Études préliminaires sur les racines de bananier. Fruits 1 6(7):371 -374.
- Hassan, A; Pantasico, EB. 1990. Banana, Fruit development, postharvest physiology, handling & marketing in ASEAN. University of the Philippines at Los Banos. Philippines. 145 p.
- Lassoudière, A. 1980. Comportement du bananier Poyo au second cycle. III. Etude d'une population. Fruits 35(1):3-17.

- López, MA. 1999. Distribución de raíces y zona de absorción de nutrientes en el cultivo de banano. CORBANA 25 (52): 217-226.
- Pérez, L. 1999. Renovación de plantaciones de banano y su relación con la presencia de raíces sanas y producciones altas. CORBANA 25 (52): 211- 216.
- Robinson, JC. 1996. Bananas and Plantains. Institute for tropical and subtropical crops. Cab International. South Africa. 237 p.
- Sancho, VH. 1990. Respuesta del clon Cavendish Gigante (Musa AAA) a tres condiciones de drenaje. CORBANA. Informe Anual 1990. 71- 76.
- Sancho, VH. 1993. Distribución radicular del clon Valery (Musa AAA) Cavendish gigante en tres diferentes condiciones de drenaje. CORBANA. Informe anual 1993: pag 32-34.
- Simmonds, N. W. 1973. Los plátanos. Editorial Blue. Barcelona, España. 539 p. Soto, M. 1992. Bananos cultivo y comercialización. Litografía e imprenta LIL, S.A. 2da. Edición. San José Costa Rica. 650 p.
- Stover R. H; Simmonds, NW. 1987. Bananas. 3a ed. GB. Longman Group. 468 p. Turner, D. 1985. Bananas response to temperature. Agfacts 1985. Alstonville AU. 3 p.
- Van der Sluijs, P. y J.J. de Gruijter. 1985. Water table clases: a method to describe seasonal fluctuation and duration of water tables on Dutch soil maps. Agric. Water Manage. 2: 109-125.
- Philip, G. M. y D. F. Watson. "A Precise Method for Determining Contoured Surfaces". Australian Petroleum Exploration Association Journal 22: 205–212. 1982.
- Watson, D. F. y G. M. Philip. "A Refinement of Inverse Distance Weighted Interpolation". Geoprocessing 2:315–327. 1985.
- <http://help.arcgis.com/es/arcgisdesktop/10.0/help/index>. Centro de Recursos ArcGIS. Accessed May 2, 2012

## 8. Glosario

**GPS:** Sistema de geo posicionamiento global

**Pseudotallo:** Falso tallo en planta de banano

**Arrepollamiento:** Representación fenotípica de la planta de banano ante factores limitantes de estrés

**Freático:** Se aplica a las aguas acumuladas en el subsuelo sobre una capa impermeable

**Isobatas:** Mapa de curvas que representan cartográficamente la profundidad del nivel freático

**Isohipsas:** Mapa de curvas que representan cartográficamente la profundidad del nivel freático tomando como referencia un punto

**Bacota o chira:** Inflorescencia de la planta de banano que desarrolla el fruto

**Pozo de observación:** orificio que se realiza en el suelo al barrenarlo, hasta una profundidad en la cual el nivel freático es medido (mínimo 2 metros).

**Parida:** Planta que inicia el proceso de emisión del racimo se considera como tal hasta el momento en el que su racimo es cosechado.

**Software:** Equipamiento lógico o soporte lógico de un sistema informático necesarios que hacen posible la realización de tareas específicas

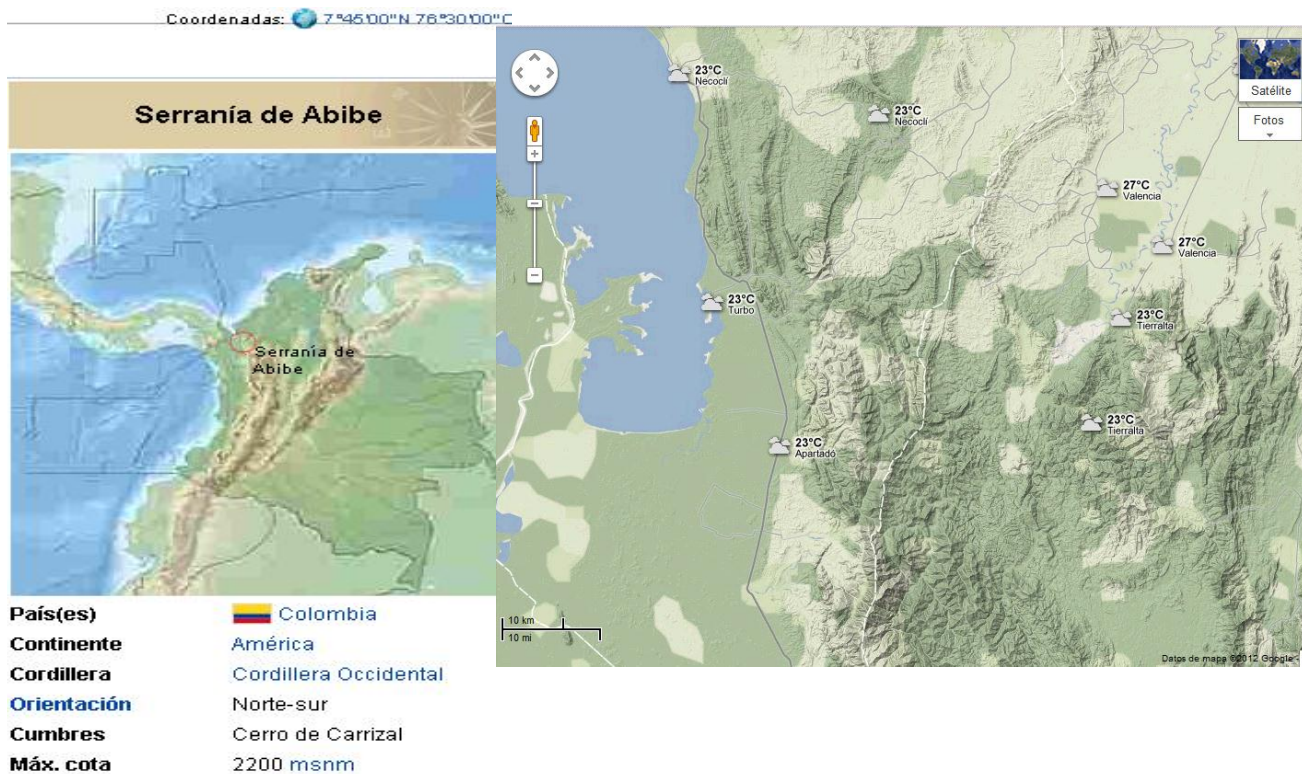
**Hardware:** Corresponde a todas las partes tangibles de un sistema informático

**Postcosecha:** Etapa del cultivo en la cual se hace un proceso (valor agregado) a la fruta de banano después de ser cosechada

**Embarque:** Proceso de postcosecha en la cual se empaca el banano en cajas de cartón.

## 9. Anexos / apéndices

- Ubicación geográfica de la serranía de Abibe en Colombia

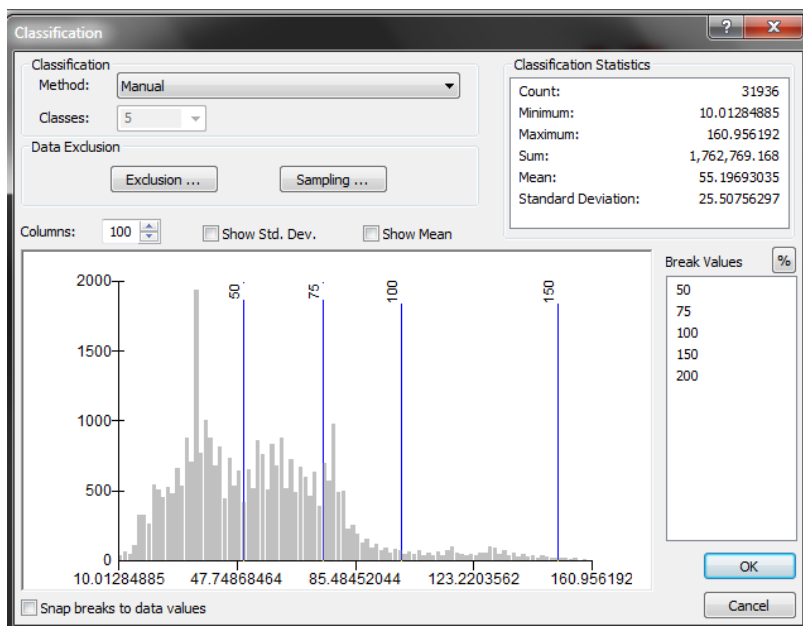


- Relación de áreas por lote de la finca El Paso

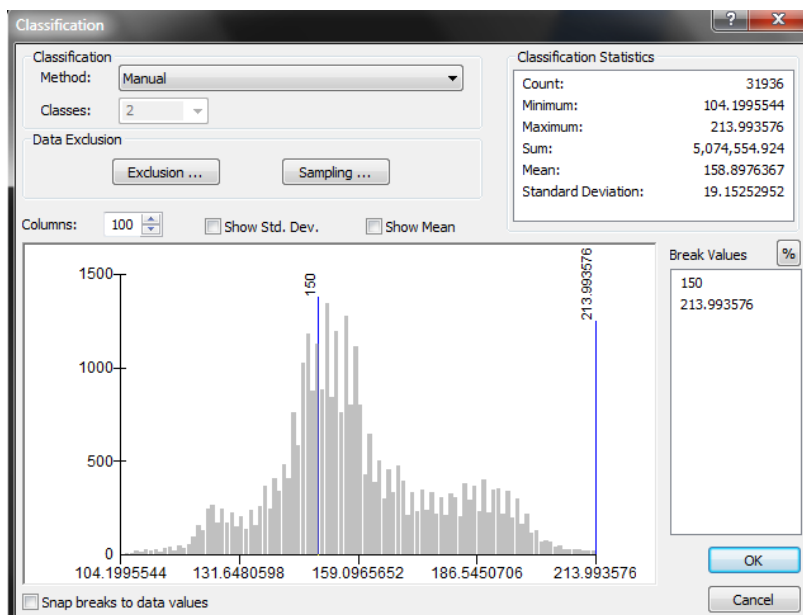
FID	Shape	SHAPE_area	SHAPE_len	Lote	Area_neta
18	Polygon	9.950637	1707.275825	1	9.950637
24	Polygon	8.310267	1447.836907	2	8.310267
25	Polygon	3.556938	835.490187	3	3.556938
22	Polygon	6.510748	1047.14842	4	6.510748
23	Polygon	6.649439	1648.575476	5	6.649439
21	Polygon	5.531473	1440.369756	6	5.531473
19	Polygon	3.04904	792.816568	7	3.04904
20	Polygon	4.69206	1533.593418	8	4.69206
26	Polygon	5.704749	1610.41761	9	5.704749
27	Polygon	6.341145	1474.023819	10	6.341145
28	Polygon	5.19072	1191.451829	11	5.19072
17	Polygon	3.908905	925.349274	12	3.908905
16	Polygon	5.886196	1288.315403	13	5.886196
15	Polygon	4.351407	1168.729506	14	4.351407
14	Polygon	6.216712	1605.887396	15	6.216712
13	Polygon	6.321106	1519.598997	16	6.321106
12	Polygon	5.962514	1444.007409	17	5.962514
11	Polygon	5.606067	1347.760827	18	5.606067
10	Polygon	5.203191	1243.213096	19	5.203191
9	Polygon	4.594564	1148.552153	20	4.594564
8	Polygon	6.270196	1149.543642	21	6.270196
6	Polygon	4.925719	1199.025379	22	4.925719
3	Polygon	7.905658	1279.153905	23	7.905658
7	Polygon	4.847999	1037.161783	24	4.847999
2	Polygon	5.965432	2063.026403	25	5.965432
5	Polygon	6.498769	1743.098534	26	6.498769
1	Polygon	8.345066	1273.411536	27	8.345066
4	Polygon	6.950044	1275.041079	28	6.950044
30	Polygon	6.848434	1458.266532	29	6.848434
31	Polygon	5.376432	1131.090666	30	5.376432
0	Polygon	8.206754	1487.166061	31	8.206754
29	Polygon	5.666882	1057.575413	32	5.666882
33	Polygon	5.634412	1130.759324	33	5.634412
32	Polygon	6.532967	1340.464613	34	6.532967



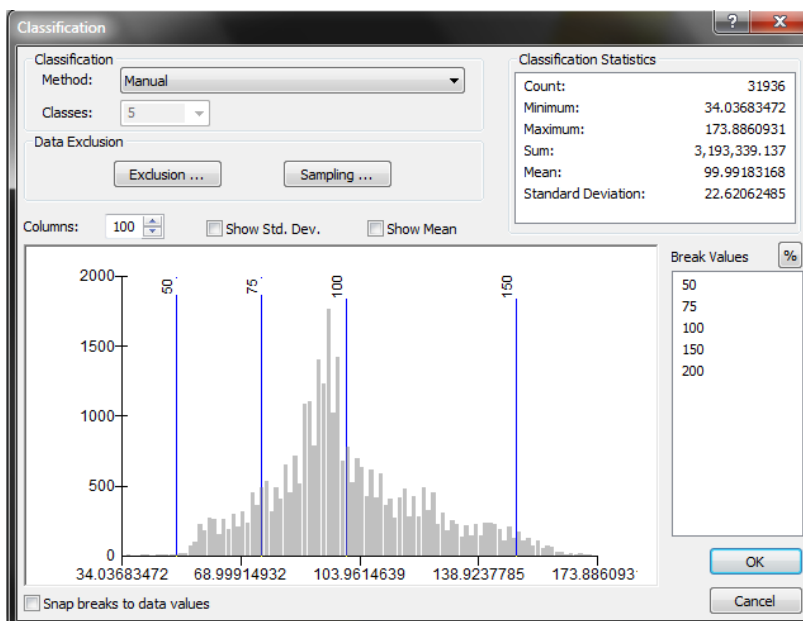
- Histograma datos de nivel freático semana 1 del 2011



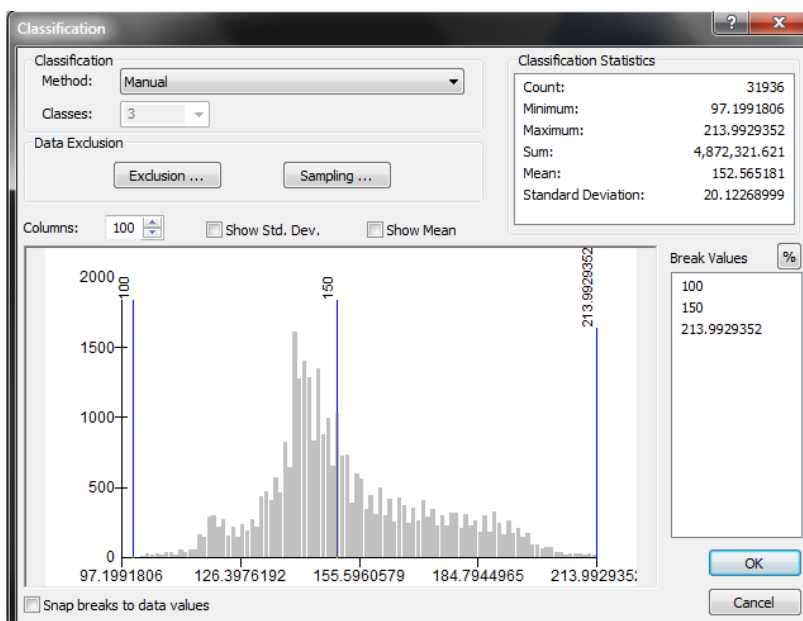
- Histograma datos de nivel freático semana 21 del 2011



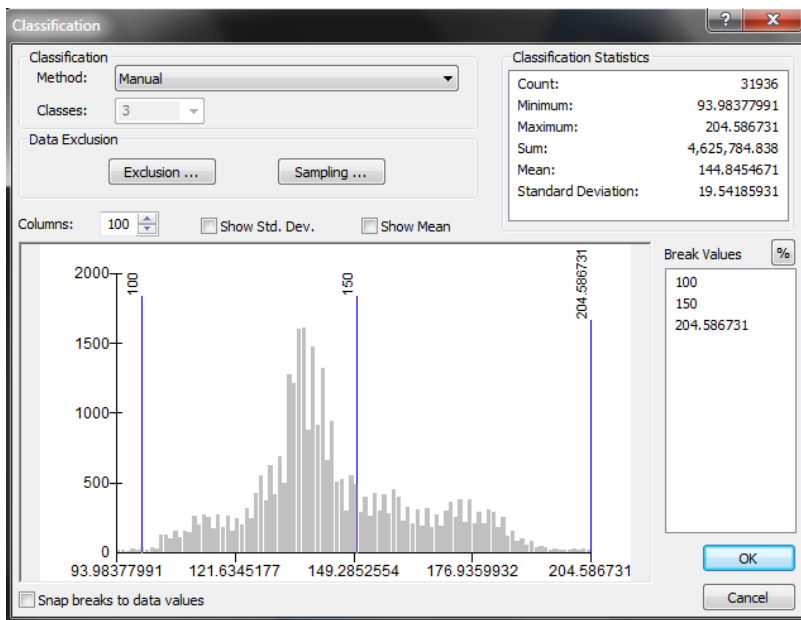
- Histograma datos de nivel freático semana 31 del 2011



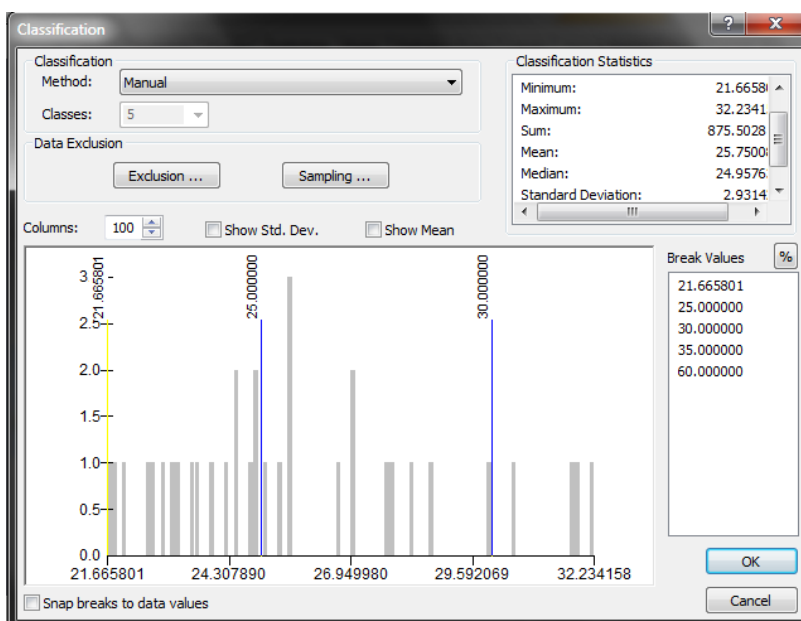
- Histograma datos de nivel freático semana 44 del 2011



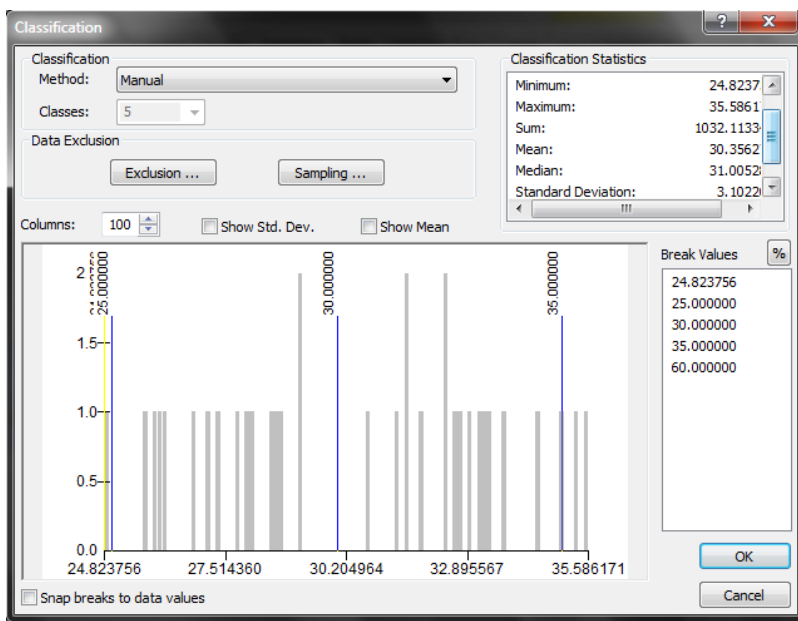
- Histograma datos de nivel freático promedio semana 1 del 2011 a 12 del 2012



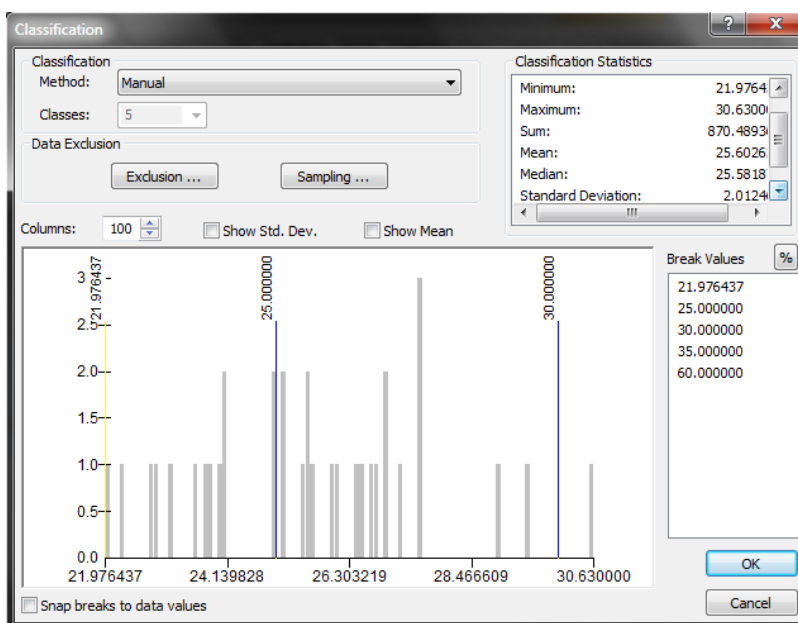
- Histograma datos de peso semana 13 del 2011



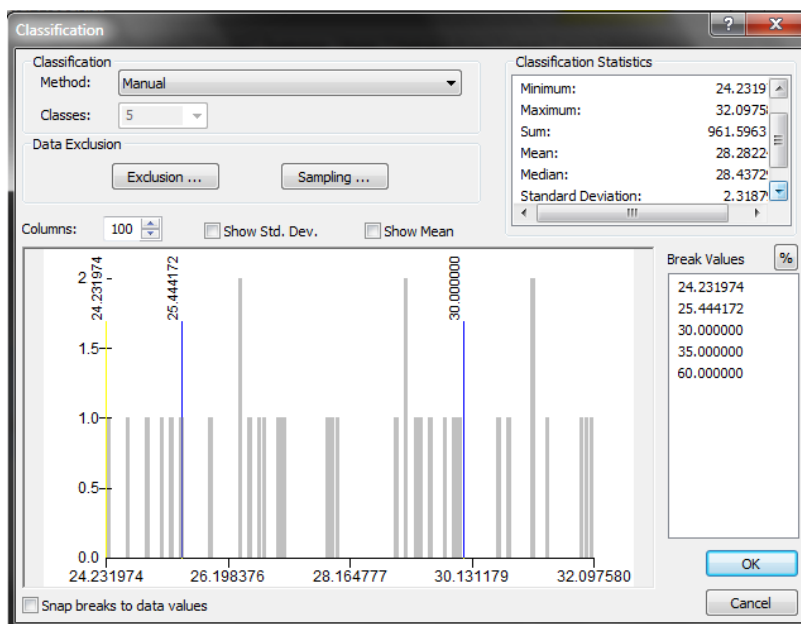
- Histograma datos de peso semana 33 del 2011



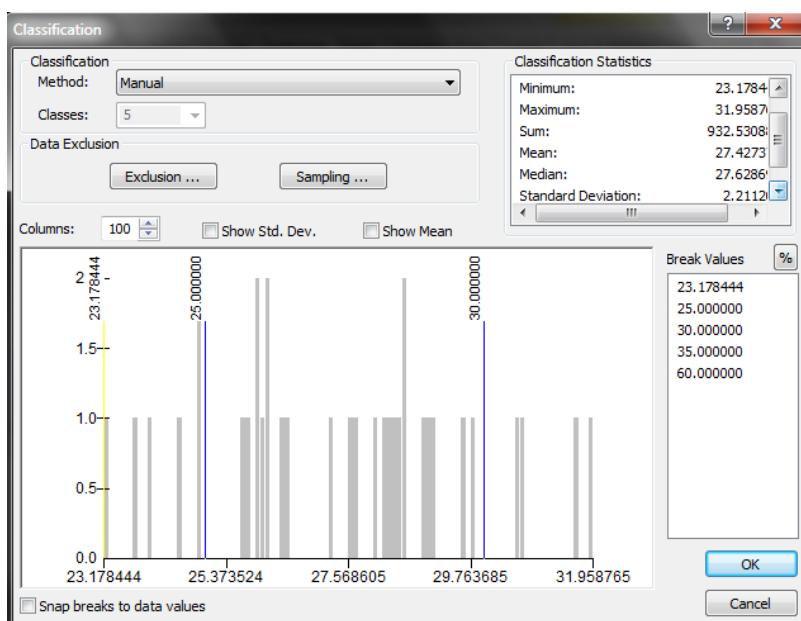
- Histograma datos de peso semana 46 del 2011



- Histograma datos de peso semana 04 del 2012



- Histograma datos de peso promedio semana 1 del 2011 a la 12 del 2012



- Detalles de un pozo de observación o freaticométrico

