



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

Epidemiología de la pudrición del cogollo de la palma de aceite

Édgar Ricardo Benítez Sastoque

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Agronomía, Departamento de Agronomía
Bogotá, D.C., Colombia

2011

Epidemiología de la pudrición del cogollo de la palma de aceite

Édgar Ricardo Benítez Sastoque

Tesis presentada como requisito parcial para optar al título de:
Doctor en Ciencias Agropecuarias-Área Agraria

Directora:
PhD Celsa García Domínguez
Codirector:
PhD Edilberto Cepeda

Línea de Investigación:
Fitopatología - Epidemiología

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Agronomía, Departamento de Agronomía
Bogotá, D.C., Colombia
2011

Agradecimiento

Este trabajo no nació con la tesis de doctorado es el resultado de interactuar durante muchos años con personas que aman su trabajo y que lograron imprimir en mí algo de ese amor: Inició hace cerca de 15 años cuando el profesor **Juan Ospina** nos mostró todas las posibilidades de trabajar con SAS, un "software" que ayudaba a perder el miedo a la estadística, pero aún con esa poderosa herramienta, esta disciplina salida de ese contexto era un área oscura y confusa, solo fue con la llegada del profesor **Ricardo Martínez** que todo se aclaró, ahí mi fascinación por la estadística se consolidó. Sin embargo, fue el profesor **Enrique Torres** el que dio norte a lo que en ese momento era solo un "hobbie", al mostrarme las posibilidades de la epidemiología. En ese momento tuve la suerte de conocer al ingeniero **Édgar Barrera**, junto con quien inciamos una cruzada, hacer cambiar de forma de pensar al mundo palmicultor, ya no lo queríamos ver disgregado sino unido a la luz de un objetivo común. Con eso en mente comenzamos a trabajar en un reto grande, manejar de manera regional los problemas sanitarios, y así propusimos, luego de varios años, este trabajo de tesis, el cual fue apoyado sin dudas por al profesora **Celsa García**, la cual, a pesar de que era consciente de lo que se venía no dudo un segundo en aceptar el reto. Con el equipo ya formado, fuimos a tocar puertas a las plantas extractoras de aceite y allí los gerentes **Argemiro Reyes, León Dario Uribe y Tito Salcedo**, nos ofrecieron su apoyo incondicional, vieron en el proyecto la posibilidad de concretar su sueño de ver un Magdalena Medio unido a favor de una palmicultura racional. Teníamos claras nuestras debilidades conceptuales y acudimos al profesor **Edilberto Cepeda**, un estadístico sensible a los problemas de su país quien aportó sus experiencias en la búsqueda de la mejor respuesta al problema planteado y al doctor **Aníbal Tapiero** epidemiólogo con quien compartimos muchas cosas en común. Armado el plan, llegaron **Nelly, Javier, Marco y Raul**, un equipo de santandereanos que aman su tierra, quienes junto con **Issueh Arenas y Gabriel Garzón** pasantes de la Universidad de Cundinamarca no ahorraron esfuerzos para recorrese todo el Magdalena Medio enseñando a la gente, viendo y registrando lo que ni un satélite puede, las plantas y el

entorno. Pero como sin amigos uno no va a ningún lado, debo recordar a Omar Santana, compañero incondicional a quien le debo millones de gracias. Por último, pero no menos importantes, **Fernando Aldana** y **Germán Leyva**, estudiantes de la Facultad de Agronomía en Bogotá, excelentes profesionales que aceptaron el reto de ayudarme a organizar semejante volumen de datos. A todos, gracias por su aporte, paciencia y buena disposición para trabajar y discutir con alguien que no tiene entre sus opciones echarse para atrás!

La perspectiva errónea de la ciencia se descubre por su avidez de ser verdadera.

Karl Popper

Resumen

En el periodo entre los años 2008 a 2010 se organizó una campaña fitosanitaria en la región comprendida entre los departamentos de Antioquia, Cesar, Santander y Magdalena, también conocida como la Zona Central Palmera Colombiana o Magdalena Medio Colombiano (MMC). El objetivo fue el de implementar una estrategias regional de manejo de la enfermedad pudrición del cogollo de la palma de aceite (PC). Los objetivos específicos se centraron en aspectos de modelación de la enfermedad y trabajo participativo con los agricultores. Se implementó un plan de manejo sanitario que comprometió a todos los estamentos interesados: Gremio, pequeños y grandes agricultores, ONG's e instituciones estatales. Con este trabajo se propone un enfoque interdisciplinario, donde el nivel regional se circunscribe al resto de las escalas y donde el uso de sistemas de información en la web genera los insumos de datos para los análisis de evolución de dichos procesos epidemiológicos.

Palabras clave: Pudrición del cogollo de la palma de aceite, SIG con participación pública, análisis exploratorio de factores, geoestadística, epidemiología.

Abstract

In the period between 2008-2010 a phytosanitary campaign was organized in the region between the departments of Antioquia, Cesar, Santander and Magdalena, also known as the Central Zone. The main objective was to implement a regional management to bud rot disease of palm oil. The specific objectives were focused on modeling aspects of the disease and participatory work with farmers. Health management plan that committed all the stakeholders was implemented: small and large farmers, NGOs and government institutions. With this work an interdisciplinary approach, where the regional level is limited to the rest of the scales and where the use of information systems on the web generates input data for analysis of epidemiological evolution of these processes is proposed.

Contenido

	Pág.
Agradecimiento	III
Resumen	V
Abstract	VI
Lista de figuras	XIII
Lista de tablas	XVIII
Introducción	1
1. Historia de la pudrición del cogollo de la palma de aceite	4
1.1 Abstract	¡Error! Marcador no definido.
1.2 Introduction.....	7
1.3 Economic importance.....	10
1.4 History	11
1.5 Final considerations.....	14
1.6 Literature cited.....	23
2. Seguimiento regional de la enfermedad mediante enfoque participativo y sistemas de información geográfico	31
2.1 Resumen.....	31
2.2 Introducción.....	32
2.2.1 Enfoque	33
2.2.2 Sistemas de soporte a decisiones: OLAP y SOLAP	33
2.2.3 SIG	35
2.2.4 PPGIS.....	38
2.3 Materiales y Métodos.....	43
2.3.1 Ubicación.....	43
2.3.2 Unidades de evaluación.....	43
2.3.3 Modelo participativo de trabajo	43
2.3.4 Datos capturados	44
2.3.5 Sistema SOLAP	52
2.4 Resultados y discusión.....	54
2.4.1 Área evaluada.....	55
2.4.2 Participación de la comunidad.....	57
2.4.3 SOLAP	58
2.5 Consideraciones finales.....	63

2.6	Literatura Citada.....	65
3.	Modelo espacial y temporal de PC	68
3.1	Resumen.....	68
3.2	Introducción	69
3.2.1	Tasas de desarrollo	70
3.2.2	Análisis multivariado	73
3.2.3	Componentes principales.....	74
3.2.4	Análisis exploratorio de factores.....	76
3.2.5	Modelos estadísticos espaciales	79
3.2.6	Geoestadística.....	80
3.3	Materiales y Métodos.....	82
3.3.1	Datos utilizados	82
3.3.2	Estimación tasas de desarrollo de la enfermedad.....	87
3.3.3	Análisis espacial.....	89
3.3.4	Variables meteorológicas y su asociación con la enfermedad	90
3.3.5	Modelo de pronóstico con datos nutricionales, agroecológicos y de producción	91
3.4	Resultados y discusión	92
3.5	Consideraciones finales	129
3.6	Literatura Citada.....	131
4.	Elementos para discusión	135
4.1	Epigenética y genética en el proceso patogénico	136
4.2	Enfoque científico.....	142
4.3	Propuesta de enfoque.....	144
4.4	Literatura citada	146

Lista de figuras

	Pág.
Figure 1.1-A: Symptomology of oil palm bud rot. Initial lesions in unopened leaves.....	8
Figure 1.1-B: Necrosis descending toward the meristematic zone.	8
Figure 1.1-C Recovering palms with the production of new leaves after being affected by BR.....	8
Figure 1-2: Map of Colombia showing the locations of the principal palm cultivation areas.....	9
Figure 1-3: Presence of <i>R. palmarum</i> larvae in oil palm plants affected by bud rot.....	13
Figura 1-5: History of research of the biotic aetiology of bud rot disease in oil palm in Colombia. Dotted lines indicate that the study only found association of the organism with the disease; solid lines indicate that the author(s) concluded that the organism is the causative agent.....	16
Figura 1-6: Diagram representing the studies that have been carried out on the relationship between abiotic factors and the BR disease in oil palm. Green lines indicate an inverse relationship between the factor and oil palm bud rot and red lines indicate a direct relationship. The numbers in parentheses indicate the number of authors that reported the results, which can be seen in Table 1-1.....	;Error! Marcador no definido.
Figura 2-1: Infografía sobre el volumen de datos que fluye en la red.....	34
Figura 2-2: Elementos e interacciones de un sistema OLAP.....	34
Figura 2-3: Modelos de participación pública, donde se detalla el nivel de participación dependiendo del nivel de empoderamiento que se le delega a la comunidad en la toma de decisiones. a) Escalera de Arnstein, 1960; b) Rueda de Davidson, 1998.....	41
Figura 2-4: Relación entre la escala geográfica y la proporción de la población que está dispuesta a participar.....	42
Figura 2-5: Capacitaciones a productores de palma de aceite asociados a diferentes Plantas Extractoras de Aceite de Palma de la zonas aledañas a Puerto Wilches.	44
Figura 2-6: Sintomatología asociada a pudrición de cogollo en palma de aceite: a) Cogollo mostrando pudrición; b) Disección de una palma afectada, donde se muestra la profundidad de la lesión; c) Palma en proceso de recuperación luego de ser atacada por la enfermedad; d) Palma en estado avanzado de la enfermedad; e) Corte transversal, donde se muestra la profundidad de la lesión; f) Fotografía aérea de un foco de palma; g) Sintomatología asociada a los estados iniciales de la enfermedad; h) Colapso del cogollo por pudrición en su base; i) Palma en recuperación; j) Detalle de una palma reiniciando la producción de flechas.....	46

Figura 2-7: Diagrama que representa un cubo multidimensional OLAP resumido para SIG de la enfermedad pudrición del cogollo en palma de aceite en el Magdalena Medio colombiano.....	52
Figura 2-8: Esquema de la estructura del SIG-WEB http://sigpalma.maintask.net	54
Figura 2-9: Histograma de la distribución de los tamaños de las unidades productivas de palma de aceite (lotes) en el Magdalena Medio Colombiano.	56
Figura 2-10: Histograma de la distribución de los tamaños de las plantaciones de palma de aceite en el Magdalena Medio Colombiano.....	56
Figura 2-11: Modelo entidad-relación para el SIG-WEB adaptado para el seguimiento de la enfermedad pudrición del cogollo de palma de aceite en la zona del Magdalena Medio Colombiano.....	61
Figura 2-12: Imágenes en pantalla de la pagina web http://sigpalma.maintask.net . En donde se observan los diferentes pasos para: ingresar a ella y las alternativas de manejo de bases de datos y presentación de información. a) Pagina donde se muestran los campos en donde se ingresa el usuario y la contraseña; USUARIO: ERBS; CLAVE: coed655. b) Pagina inicial luego de ingresar a la página donde se muestran diferentes pestañas en desarrollo y el mapa de Colombia. c) Detalle ampliado del mapa de Colombia disponible en el sistema; d) Hoja de las plantaciones; e) Formulario de edición de la base de plantaciones; f) Hoja de lotes; g) Formulario de edición de la base de lotes; h) Formulario para creación de las vistas disponibles para despliegue de información; i) Vista del número de palmas afectadas donde se detalla la localización en colores y el número de palmas afectadas por semestre; j) Información de uno de los puntos accesible desde la imagen del mapa; k) Formulario de uno de los pasos para la creación de las vistas; y l) formulario de edición de privilegios de los usuarios.	62
Figura 3-1: Métodos de evaluación de concordancia de acuerdo con los niveles de medición: Kappa y curvas ROC para variables nominales; kappa ponderado y coeficiente de correlación de concordancia (CCC) para variables ordinales; y coeficiente de correlación de concordancia, índice total de desviación (ITD), probabilidad de cobertura (CP), coeficiente de correlación intraclase (CCI) y desviación cuadrada media (DCM), para variables de intervalo y de razón (Lin et al., 2002).	73
Figura 3-2: Rotación de variables para eliminar dependencia entre ellas a través de análisis de componentes principales. a) Variables en abscisas y ordenadas con la escala original mostrando asociación positiva; b) Variables rotadas donde se observa que la rotación elimina la dependencia entre estas dos variables y solo se conserva la variabilidad de cada una de ellas.....	75
Figura 3-3: Comparación entre las técnicas de componentes principales y exploratorio de factores. a) Análisis de componentes principales donde las variables explican el componente y solo se seleccionan los primeros componentes asociados a un grupo más pequeño de variables; b) Análisis exploratorio de factores donde se observa que el factor es el que explica las variables y que los factores seleccionados son menos que el número de variables originales.....	78

Figura 3-4: Incidencia en tiempo de la enfermedad pudrición del cogollo en palma de aceite en el Magdalena Medio colombiano. Tiempo cero corresponde al inicio de toma de datos del estudio epidemiológico de la enfermedad (Segundo semestre de 2006).....	93
Figura 3-5: Incidencia de la enfermedad pudrición del cogollo de palma de aceite en el Magdalena Medio colombiano. Período comprendido de los datos: Segundo semestre de 2006 a segundo semestre de 2009. a) 0 meses; b) 6 meses; c) 12 meses; d) 18 meses; e) 24 meses; f) 30 meses.....	94
Figura 3-6: Fotografía aérea de la zona del estudio epidemiológico de la enfermedad pudrición del cogollo en palma de aceite en el Magdalena Medio colombiano. Se señala la desembocadura del rio Sogamoso en el rio Magdalena y las ciénagas de Corredor y Montecristo y el foco de la enfermedad, estimado a partir de los valores de intercepto de los modelos de progreso gompertz. Fuente: GogleEarth.....	95
Figura 3-7: Valores reales de incidencia de la enfermedad pudrición del cogollo en palma de aceite en el Magdalena Medio colombiano. Datos observados desde el segundo semestre de 2006 al segundo semestre de 2009.....	97
Figura 3-8: Histogramas de diagnóstico de los modelos evaluados. a) desvíos del punto crítico dos de la estadística de Durbin-Watson; b) coeficiente de correlación de concordancia entre los valores predichos por los modelos y los valores reales; c) medida de sesgo utilizada en el CCC para selección del modelo más concordante; d) medida de precisión utilizada en el CCC para selección del modelo más concordante.....	100
Figura 3-9: Intervalos de confianza al 95% para los coeficientes de correlación de concordancia entre los valores observados y los predichos a través del modelo gompertz, para las curvas de progreso de las epidemias.....	101
Figura 3-10: Curvas de progreso de la enfermedad de acuerdo con modelos gompertz para todos los lotes del estudio que al menos hubieran tenido dos lecturas en el tiempo. a) Cuartil 1 (25% de los lotes) correspondiente a las plantaciones ubicadas al sur del estudio; b) Cuartil 3 (50% de los lotes) correspondiente a las plantaciones ubicadas al centro del area de estudio; c) Cuartil 4 (25% de los lotes) correspondientes a las plantaciones ubicadas al norte de la zona de estudio.....	102
Figura 3-11: Pronósticos de epidemias de pudrición del cogollo de la palma de aceite, utilizando el modelo de Gompertz para lotes con al menos dos reportes de incidencia en el tiempo, entre el segundo semestre de 2006 y el segundo semestre de 2009. a) 6 meses; b) 12 meses; c) 18 meses; d) 24 meses; e) 30 meses; f) 36 meses.....	103
Figura 3-12: Tasas de desarrollo de pudrición del cogollo de la palma de aceite en la zona del Magdalena Medio Colombiano. a) Histograma de frecuencia; b) patrón espacial de las tasas de la enfermedad; c) incidencia máxima pronosticada al segundo semestre de 2009; y c) componente principal entre las variables tasa de desarrollo de la enfermedad y la incidencia máxima al segundo semestre de 2009.....	104
Figura 3-13: Variogramas isotrópicos y anisotrópicos de las tasas de desarrollo de un modelo gompertz para la enfermedad pudrición del cogollo en la zona del magdalena medio colombiano: a) semivariograma isotrópico exponencial; b) semivariogramas anisotrópicos exponenciales a 60° y 165°.....	105

Figura 3-14: Variogramas isotrópicos y anisotrópicos de las tasas de desarrollo de un modelo gompertz para la enfermedad pudrición del cogollo en la zona del magdalena medio colombiano: a) semivariograma isotrópico exponencial; b) semivariogramas anisotrópicos exponenciales a 60° y 165°.	106
Figura 3-15: Predicciones kriging de las tasa de desarrollo de la epidemia.	107
Figura 3-16: Predicciones espaciales y temporales de la epidemia a partir de un modelo temporal gompertz y uno espacial de tipo exponencial. a) 12 meses; b) 18 meses; c) 24 meses; d) 30 meses; e) 36 meses; f) 42 meses; g) 48 meses; h) 54 meses; i) 60 meses.	108
Figura 3-17: Curva entre los valores observados de tasa de desarrollo de epidemia en las epidemias reservadas para validación y las estimaciones kriging para dichos puntos.	109
Figura 3-18: Relación de la frecuencia de vientos en dirección a las zonas de mayor y menor semivarianza de la epidemia, discriminado por hora del día.	109
Figura 3-19: Histogramas de frecuencia de los contenidos de nitrógeno en hoja 17 en los periodos de predisposición (2001-2003) y de infección (2004-2006).	113
Figura 3-20: Histogramas de frecuencia de los contenidos de fósforo en hoja 17 en los periodos de predisposición (2001-2003) y de infección (2004-2006).	114
Figura 3-21: Histogramas de frecuencia de los contenidos de potasio en hoja 17 en los periodos de predisposición (2001-2003) y de infección (2004-2006).	115
Figura 3-22: Histogramas de frecuencia de los contenidos de calcio en hoja 17 en los periodos de predisposición (2001-2003) y de infección (2004-2006).	116
Figura 3-23: Histogramas de frecuencia de los contenidos de magnesio en hoja 17 en los periodos de predisposición (2001-2003) y de infección (2004-2006).	117
Figura 3-24: Histogramas de frecuencia de los contenidos de azufre en hoja 17 en los periodos de predisposición (2001-2003) y de infección (2004-2006).	118
Figura 3-25: Histogramas de frecuencia de los contenidos de boro en hoja 17 en los periodos de predisposición (2001-2003) y de infección (2004-2006).....	119
Figura 3-26: Histogramas de frecuencia de los contenidos de hierro en hoja 17 en los periodos de predisposición (2001-2003) y de infección (2004-2006).	120
Figura 3-27: Histogramas de frecuencia de los contenidos de manganeso en hoja 17 en los periodos de predisposición (2001-2003) y de infección (2004-2006).	121
Figura 3-28: Histogramas de frecuencia de los contenidos de cinc en hoja 17 en los periodos de predisposición (2001-2003) y de infección (2004-2006).....	122
Figura 3-29: Histogramas de frecuencia de los contenidos de cobre en hoja 17 en los periodos de predisposición (2001-2003) y de infección (2004-2006).	123
Figura 3-30: Histogramas de frecuencia de los contenidos de producción en hoja 17 en los periodos de predisposición (2001-2003) y de infección (2004-2006).	122
Figura 3-31: Cargas factoriales del modelo con el valor más alto valor de suficiencia de muestreo (MSA).	125
Figura 3-32: Relación entre las cargas factoriales del factor asociado a la enfermedad pudrición del cogollo de la palma de aceite, relacionadas arcillas, valores mínimos de magnesio y de cobre.....	127
Figura 3-33: Relación entre las cargas factoriales del factor asociado a la enfermedad pudrición del cogollo de la palma de aceite, relacionadas con bosques y caños.....	127

Figura 3-34: Relación entre las cargas factoriales del factor asociado a la enfermedad relacionados con drenaje, arcillas y rango intercuartil de azufre.....	128
Figura 3-35: Relación entre las cargas factoriales del factor asociado a la enfermedad relacionados con calle palera, arcillas y rango intercuartil de potasio y de producción,.....	128
Figura 4-1: Diagrama de la historia de la fitopatología: contraste entre los modelos epigenéticos y los genéticos. Y como la epidemiología interviene en el proceso para unificar las dos vertientes en un solo modelo.....	139

Lista de tablas

	Pág.
Table 1-1: Summary of the principal studies on the relationship between physicochemical variables of the soil with the incidence of oil palm bud rot.....	19
Tabla 2-1: Variables registradas en plantaciones de palma de aceite para la construcción del catastro de la zona.....	47
Tabla 2-2: Descripción del número de capacitaciones hechas sobre manejo de la enfermedad pudrición del cogollo en palma de aceite discriminadas entidad que convocaba en la zona del Magdalena Medio colombiano.	57
Tabla 3-1: Modelos linealizados y no linealizados evaluados para las epidemias de pudrición del cogollo de palma de acetite.....	71
Tabla 3-2: Análisis foliar hoja 17, antes y después de la epidemia.	112
Tabla 3-3: Resumen del análisis de factores y regresión lineal, mostrando criterios de calidad y de selección del modelo.....	126

Introducción

El ser humano en su deseo de comprender y manejar su entorno ha creado estrategias que le ayudan a avanzar en esta tarea. Es así que para entender un fenómeno en la naturaleza parte de la creencia que existe una verdad en relación al fenómeno. A esta verdad no se le puede acceder de manera inmediata sino que tiene que proceder de acuerdo con un método para conseguirla. Observa el fenómeno, construye un modelo que se ajuste a las observaciones y genera preguntas que al responderlas validan o descartan el modelo propuesto. Este proceso se le ha denominado método científico.

Inicialmente el método científico concebido por Bacon en 1620, proponía el método inductivo como la metodología básica de trabajo, el cual parte de la idea de que a medida que se van acumulando los datos que confirman una teoría, aumenta la probabilidad de que ésta sea verdadera. Sin embargo, varios autores dudaban de esta apreciación, el primero de ellos Hume, 1748, no logra una justificación para este método, y Popper, 1959 que lo rechaza completamente, al argüir que no existe fundamento lógico ni psicológico para la probabilidad inductiva; pues siempre podrá haber una nueva observación que refute la proposición.

De una hipótesis se podrán deducir uno o varios pronósticos, bajo las condiciones en las que se realice. Estos pronósticos o resultados esperados se confrontan experimentalmente con el fin de evaluar su veracidad. Si los pronósticos concuerdan con los resultados obtenidos la hipótesis queda verificada y provisionalmente queda corroborada; pero si no hay concordancia,

la teoría de la que se han deducido queda deductivamente falsada, aunque también provisionalmente.

La contribución de Popper fue descartar el modelo inductivo y describir la ciencia comenzando en una conjetura. La conjetura puede ser falsa en todo o en parte, pero da un punto de partida para la investigación cuando se enuncia con una claridad suficiente para poder ser sometida a crítica. El progreso no se consigue investigando el mundo en busca de ejemplos confirmadores que siempre se pueden encontrar, sino buscando la evidencia falsadora que revela la necesidad de una mejor explicación.

Se resume este enfoque metodológico, pues a la fecha, es en general el aceptado por la comunidad científica mundial, sin embargo, cuando se analiza el comportamiento de las investigaciones en la enfermedad pudrición del cogollo de la palma de aceite (PC), Figura 1-5, se puede ver como los diferentes grupos de investigadores de la etiología de la enfermedad reciclan constantemente y desde diferentes ángulos la naturaleza infecciosa de esta, sin avanzar ni en su conocimiento, ni en su manejo. ¿Qué ha llevado a los investigadores a esta sin salida? La hipótesis propuesta es que estos grupos de investigación han llevado al extremo el enfoque inductivo, buscando incesantemente reunir datos para comprobar que la etiología de la enfermedad solo era posible identificarla mediante postulados de Koch, y a pesar que esta teoría era continuamente falsada, pues a cada caso le han seguido varios contraejemplos, muy pocos fueron los esfuerzos por buscar teorías que dieran una mejor explicación. Es más, en la actualidad el esfuerzo en investigación ha sido buscar la confirmación del agente causal, antes que buscar explicaciones a la gran cantidad de veces que este enfoque ha fallado.

Para Halden, 2011, los sistemas son complejos y tienden naturalmente a la complejidad, con esto aseguran su permanencia, adaptación o resiliencia, ya sea ambiental o genética, sin

embargo, los análisis complejos no son comunes en los procesos de investigación, los investigadores se basan en dogmas y paradigmas que obligan a pensar de manera simplificada. El esfuerzo por encontrar nuevas explicaciones a las teorías desaparece, como lo propone Torres, 2004, al citar a Max Plank, cuando menciona que las nuevas teorías triunfan no porque los opositores terminen convencidos, sino porque tarde o temprano, mueren. En fitopatología y en medicina el dogma del germen ha hecho que la visión compleja del sistema planta-patógeno-ambiente se descuide (Scholthof, 2007), lo que hace que la capacidad explicativa de estos modelos y por lo tanto su utilidad en la predicción sea limitada.

La PC en particular ha demostrado ser una enfermedad compleja, y en consecuencia una visión alejada de esta realidad solo demorará el avancen en las respuestas que la ciencia debe darle a los agricultores. Con este trabajo se muestra un enfoque donde a través de una visión general se intenta dilucidar la etiología de la enfermedad, o como lo propone Waggoner y Aylor, 2000, en generar una pesquisa al estilo de detectives que indaguen sobre la presencia de patrones, que ayuden en la respuesta inicial presentada por Reinking en 1928, ¿Qué causa la PC?

1. The History of Research on Oil Palm Bud Rot (*Elaeis guineensis* Jacq.) in Colombia

Historia de las investigaciones en Pudrición del Cogollo de la Palma de Aceite (*Elaeis guineensis* Jacq.) en Colombia

1.1 Abstract

This article presents an overview of the main results obtained in research of bud rot of oil palm. Aetiologic studies under biotic and abiotic approaches are explored, aiming for a model that would help on the understanding of the ethology of this disease. It also shows how the results of the studies are contradictory, and how the arguments of the biological causes no shows progress. Furthermore is discussed the results that measure the influence of abiotic factors, where there is greater consensus, which does not fail to be controversial, because depending on the investigator receives different weight in the final model of disease. This situation has led to potential pathogens control associated with the disease have to be based on circumstantial evidence, where the positive or negative response to its control may be confused with extrinsic factors such as disease escape or foci formation. Even the insect *Rhynchophorus palmarum* (L.) responsibility in the death of palms affected by the disease can be considered in doubt. It finally shows how the process of general disease research has important biases arising from the risk aversion of the palm

producers or lack of continuity of the results obtained by different research groups.

Keywords: epidemiology, tropical diseases, aetiology, abiotic stress, biotic stress.

Resumen

En este artículo se exploran los estudios etiológicos bajo enfoques bióticos y abióticos de la enfermedad pudrición del cogollo de la palma de aceite. También se muestran las diferencias en los análisis y resultados de las investigaciones en la etiología biótica, así como sus sesgos. Por otro lado se discute sobre los resultados que miden la influencia de factores abióticos, resultados que tampoco se libran de ser controvertidos y que dependiendo del investigador reciben diferentes niveles de ponderación en el modelo final de la enfermedad. Esta situación ha generado que los controles dirigidos a los posibles patógenos asociados a la enfermedad, se tengan que basar en evidencias circunstanciales, donde la respuesta se confunde con factores extrínsecos a esta. Inclusive la responsabilidad del insecto *Rhynchophorus palmarum* en la muerte de las palmas afectadas por la enfermedad se puede considerar que está en duda. Se muestra finalmente cómo el proceso de investigación general de la enfermedad presenta sesgos importantes que surgen de la presión de los agricultores a este sistema, el cual se da ante la inminencia de pérdidas económicas o a la falta de continuidad en el aprovechamiento de los resultados obtenidos por diferentes grupos de investigación.

Palabras clave: epidemiología, enfermedades tropicales, etiología, estrés biótico, estrés abiótico.

1.2 Introduction

Oil palm bud rot (BR) is a disease that destroys the young tissue of palms. The initial lesions (Figure 1-1A) descend from the middle of unopened internal leaves (spears) towards the meristematic zone. The progress of the lesions leads to colonization by several pathogenic and saprophytic organisms, completing the symptomatology (Sarria et al., 2008).

Depending on the quantity of affected tissue and whether or not the infection reaches the meristem (Figure 1-1B), BR can be a lethal disease (lethal bud rot, LBR) or a disease that only inhibits the growth of the palm for some period (Chinchilla and Duran, 1998). The former has been seen in the Brazilian and Ecuadorian Amazon, certain zones of Suriname, and the Colombian western zone (WZ) (Franqueville, 2001; Corredor et al., 2008). The latter (Figure 1-1C) has been reported in the Eastern Plains of Colombia (EPC) (Figure 1-2). A unique case occurred in the Middle Magdalena River Valley (MMRV), where the infections did not reach the meristem, but, despite this, effective recovery did not occur (Benitez, 2015). It is stated that the insect *Rhynchophorus palmarum* L. (Coleoptera: Curculionidae) was the reason why the palms were unable to recover due its direct damage to the bud (Hurtado, et al., 2009, Aldana et al., 2010, Quintero, 2010; Montes and Ruiz, 2014).

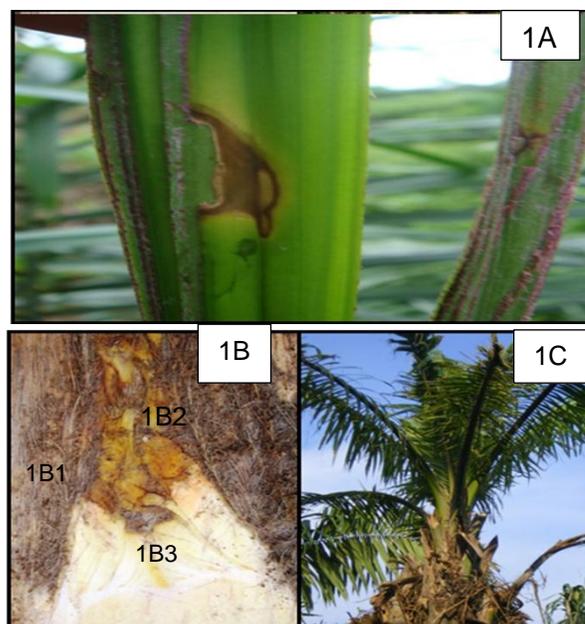


Figure 1-1. Symptomology of oil palm bud rot. 1A: initial lesions in unopened leaves. 1B: necrosis descending toward the meristematic zone. B1: petiolar bases, B2: rotted tissue, B3: Meristematic zone, 1C: recovering palms with the production of new leaves after being affected by BR. Photos A and B was provided by Cenipalma to MIRE-PC project.

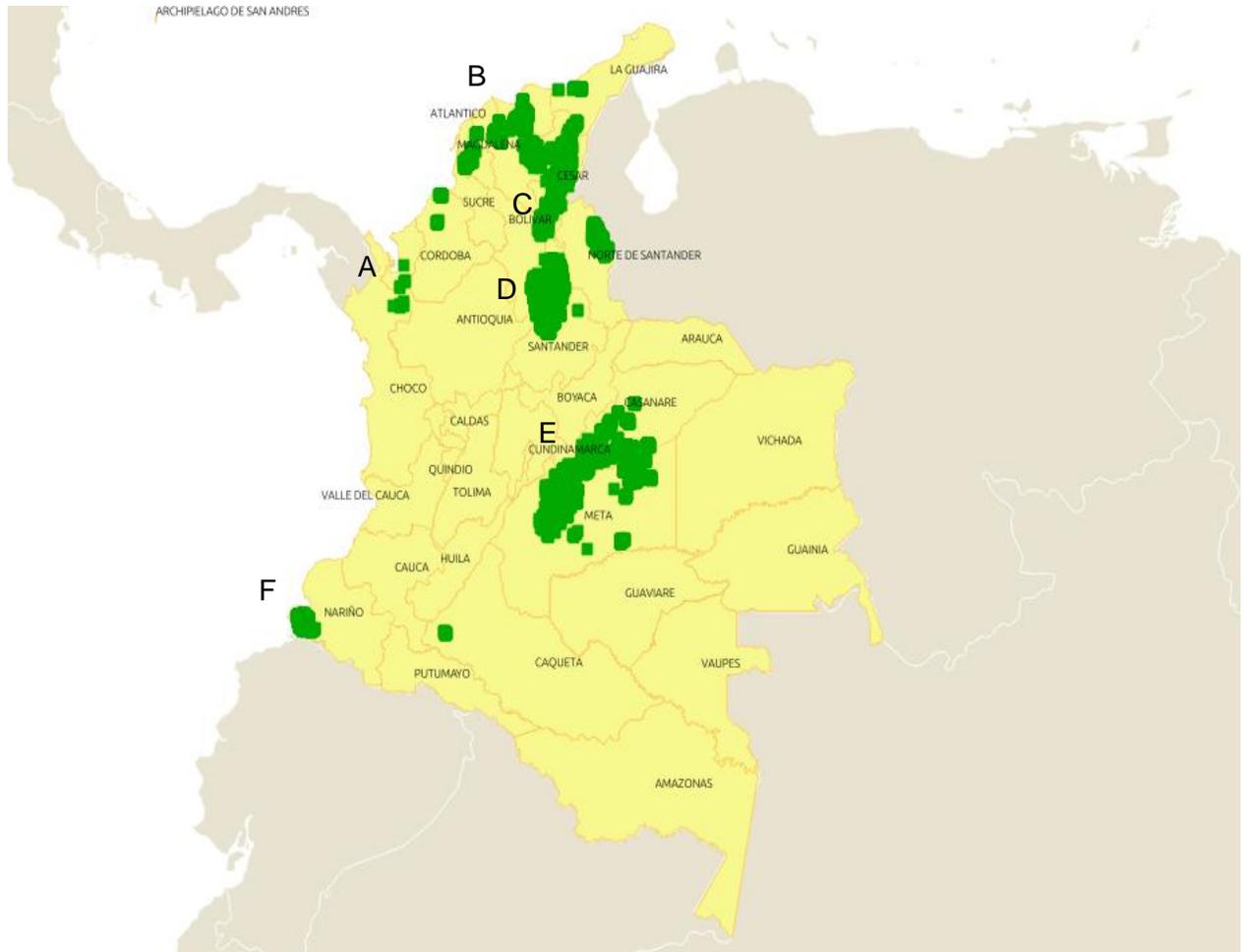


Figure 1-2. Map of Colombia showing the locations of the principal palm cultivation areas. A: Urabá Zone (UZ); B: North Coast Zone (NCZ); C: South of Cesar Zone (SCZ); D: Middle Magdalena River Valley (MMRV) zone; E: Eastern Plains of Colombia Zone (EPCZ); F: Western Zone (WZ). Source: first author data.

Despite the fact that BR symptoms are easy to recognize in productive plantations, there are two main reasons that diagnostic confirmation through the isolation of the causal agent by Koch's postulates has not been possible, first of all, contradictory studies about its causal agent and second, fast growth of saprophytic and opportunistic organisms over rooted tissue make the isolation of any causal agent difficult. This is why, only

when the disease has disseminated throughout a population and formed foci, is it possible to differentiate it from other similar types of pathologies that have a lesser impact on the crop, such as juvenile disease, spear rot (Martinez et al., 2014), or abiotic disorders (Louise et al., 2007; Renard and Quillec, 1984; Villanueva, 1988; Breure and Soebagjo, 1991). This fact had led to the development of breeding programs in Colombia that use epidemiological approaches rather than direct inoculation for resistance selection (Navia et al., 2014).

1.3 Economic importance

The Colombian association of palm producers recognizes the fact that one of the biggest challenges for sustainability in this agroindustry is diseases control (Fedepalma, 2007; Los Angeles Times, 2010). It was reported that in 2007, the two more notable diseases, lethal wilt (LW) and BR, resulted in losses of up to US\$ 58.5 million (Fedepalma, 2007) through a reduction in oil production that oscillated between 2.3% and 9.9% for the case of BR (Acevedo et al., 2000) and through palm deaths caused by LBR and LW.

Plantations have been devastated by BR on the WZ, affecting the economy of this region. Reports for 2008 stated that 1540 direct jobs were lost due to this disease, with reductions in the potential revenue of the region of up to 46%, amounting to close to US\$ 120 million (Corredor et al., 2008), and, according to Fedepalma (2014a) for the regions Puerto Wilches (Santander) and Cantagallo (Bolívar) in MMRV, BR has resulted in losses of more than US\$ 2.85 billion and more than 8000 direct and indirect jobs.

1.4 History

BR compared with other plant diseases has had a short and accidental history that started at the beginning of the twentieth century. Reinking made one the first reports in 1928 in Panama (Franqueville, 2001), nevertheless, Van Hall in India, mentioned a similar symptomatology since 1920 (Van Hall, 1922). This disease has affected palm crops in Latin American, part of Africa (Franqueville, 2001) and apparently in India (Van Hall, 1922). Its effects have varied between, lesser production to the complete destruction of crops. In Colombia, recent reports have been made for the MMRV zone where in 2006 the first foci for the disease appeared (Benitez, 2009; cited by Martinez and Silva, 2009). This disease has demonstrated different levels of aggressiveness throughout the geography of Colombia. It started in the UZ in the 1960s where its effects were devastating (Franqueville, 2001). Afterwards, the disease appeared in the 1990s in the EPCZ (Tovar, 2014) and although its incidence almost reached the entire zone in a period of tree to four years (Tovar, 2014), the recovery of the palms was high. This phenomenon has been explained by the fact that, in this zone, the wet and dry seasons are well-defined; however, this explanation has not been demonstrated. In this region, the producers initially started to eradicate diseased palms, but, once recovery of the palms was observed, they developed a practice called surgery, which consisted of removing all of the affected tissue in the bud area with the objective of giving way to healthy tissue and favoring the natural processes of recovery in the diseased palm. This practice was implemented by the producers in the subsequent zones to be affected, the MMRV and WZ zones. However, the expected recovery was not seen in these two regions. It was speculated that the failure of this practice in these two zones was associated with the fact that, in the first years of the disease's appearance, there were historically high rainfalls resulting from the La Niña phenomenon between the years of 2005 and 2008 (NOAA, 2014) and that there was a lack of

coordination between the affected plantations, which impeded the implementation of opportune, coordinated and effective regional activities. At the beginning of the current decade, this disease was reported in NCZ, nevertheless, the evolution of this disease in this zone has not yet show the exponential behavior that has been seen in the rest of the country. This has facilitated the development of regional work incentives that, with coordination among the plantations, generate preventive and curative management plans, similar to the work done by plantations in the SCZ under the regional initiative called "Palmeros Unidos" (Fedepalma, 2014b).

Parallel to the advance of the disease, an interaction has been reported with *R. palmarum*, where palms are being destroyed through the invasion of this insect (Martinez et al., 2008). In this sense, adults of *R. palmarum* are considered an opportunistic organism that detect the odor of rotting tissue and initiate the colonization of palm buds. Their larvae can destroy internal structures and eventually reach the meristem resulting in the death of the palm. (Figure 1-3). However, to date, no study has been conducted to measure their impact on palm crops and those that have been published only offer circumstantial evidence. On the other hand, in evaluations carried out by the first author (unpublished data) on 11000 palms affected by this disease in the MMRV zone between 2008 and 2009, in exponential phase of the epidemic, only 2,2% were infested with this insect: 0,3% with pupae, 0,9% with larvae, and 0,9% with adults, which is a very low incidence rate that did not demonstrate the superposition of generations and that, as a result, was not conclusive for determining this insect as a significant factor in palm deaths.



Figure 1-3. Presence of *R. palmarum* larvae in oil palm plants affected by bud rot. Photograph provided by Cenipalma to MIRE-PC project.

Aetiology of the disease

The history of aetiology of the disease has been approached from two angles: the infectious approach by Koch's postulates and the abiotic approach that considers BR a physiological result of the palm's interaction with adverse environmental conditions (Franqueville, 2001); Laranjeira et al., (1998), cited by Franqueville, (2001), and Bergamin, et al., 1998 argued for abiotic origins; however, Van de Lande, (1993) and Van de Lande and Zadoks, (1999) concluded that this disease is biotic in nature.

▪ Biotic aetiology

In the biotic discussion, there have been an abundance of hypotheses, arguments, contradictions, and conclusions for the responsibility attributable to the organisms involved in this pathogenic process. Figure 1-4 shows how, after almost a century of studies on this disease, Sarria et al. in 2008 agree with Reinking in 1928 which stated that *Phytophthora* sp. is the causal agent of this disease, nevertheless, it is important to emphasise that this genus is the only one to have been explicitly discarded by Quillec (1983). There are also contradictions between the findings; for example, Ploetz, (2007a) reported *Thielaviopsis paradoxa* as a possible casual agent but later discarded this idea in the same year (Ploetz, 2007b), even suggesting that this disease does not have a biotic origin. Interestingly, with the exception of viruses, viroids, phytoplasma (Dollet, 1991;1992; Dollet et al.,1994) and nematodes (Guevara and Nieto 1999), almost all of the taxonomic groups of pathogenic microorganisms have been associated in one form or another to the pathogenesis of this disease (Franqueville, 2001) (Figure 4). Specifically, in regards to casual agents, the following have been implicated: *Erwinia* sp. for bacteria (Quillec et al., 1984; Allen et al., 1995);

Thielaviopsis and Fusarium for fungi (Vargas, 1992; Nieto, 1996; Sanchez, 1990; Gomez et al., 2000); and Pythium and Phytophthora for Oomycete (Reinkin, 1928; Quillec et al., 1984; Nieto, 1996; Sanchez et al., 1999; Sarria et al., 2008).

▪ **Abiotic aetiology**

In the abiotic debate, the majority of authors have used the approach that nutritional factors have an effect on the increase or decrease of this disease. However, there are exceptions from authors such as Pacheco et al., (1985), Gomez, (1995) and Van Slobbe, (1996), who indicated that the incidence of this disease is independent of the nutritional state of the soil or of the plant. Notably, at the foliar level, the research results have indicated that the disease develops under conditions of high levels of the macroelements nitrogen, calcium, and magnesium and the microelement iron; and with deficiencies of the macroelements phosphorus and potassium in conjunction with the microelements zinc, copper, iron, and manganese. In regards to the soil values, it has only been reported that a general deficiency of nutrients is correlated with a higher incidence of the disease. For the other physicochemical properties of the soil, the findings agree on the idea that all of the variables associated with drainage problems, including porosity, water conductivity, clay content, and compaction, facilitate the development of BR; likewise, the concentration of exchangeable aluminum and pH are variables that are highly correlated with this disease (Figure 1-5, Table 1). All of this findings led to the development of the first disease management programs in Colombia (Munevar et al., 2001).

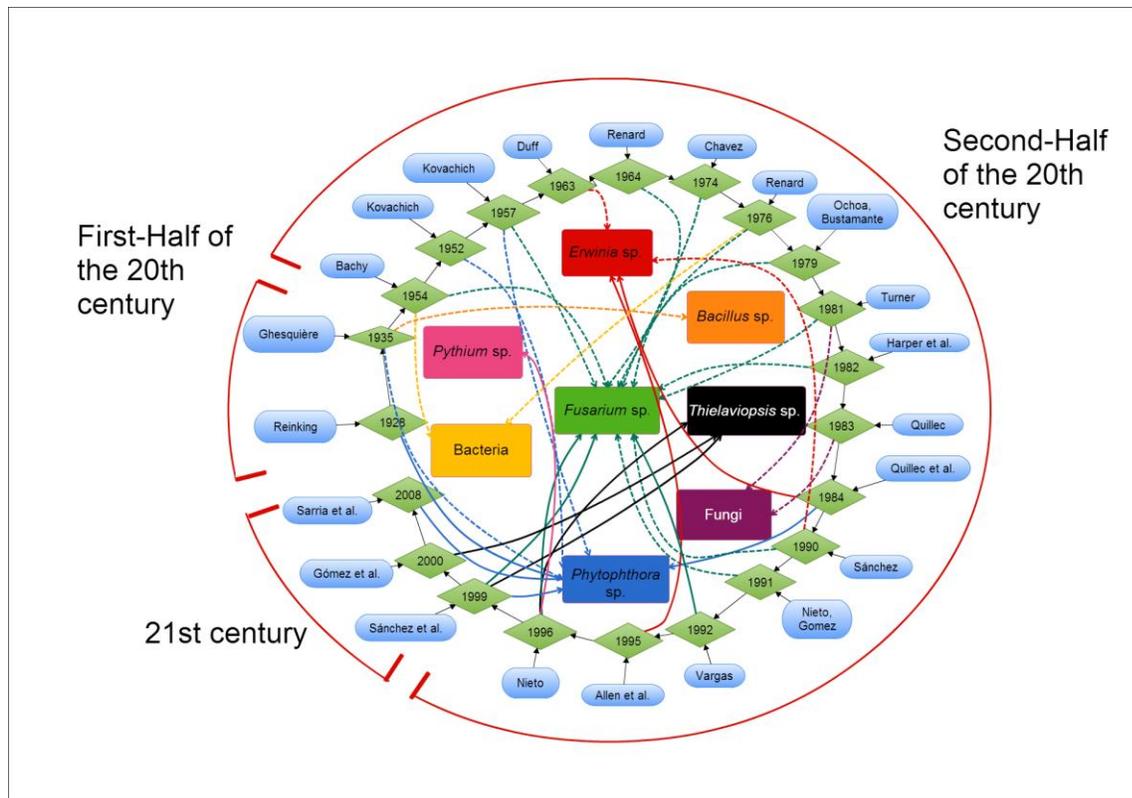


Figure 1-4: History of research of the biotic aetiology of bud rot disease in oil palm in Colombia. Dotted lines indicate that the study only found association of the organism with the disease; solid lines indicate that the author(s) concluded that the organism is the causative agent. Renard, 1964, Harper et al., 1982 and Reinking, 1928 are cited by Franqueville, 2001.

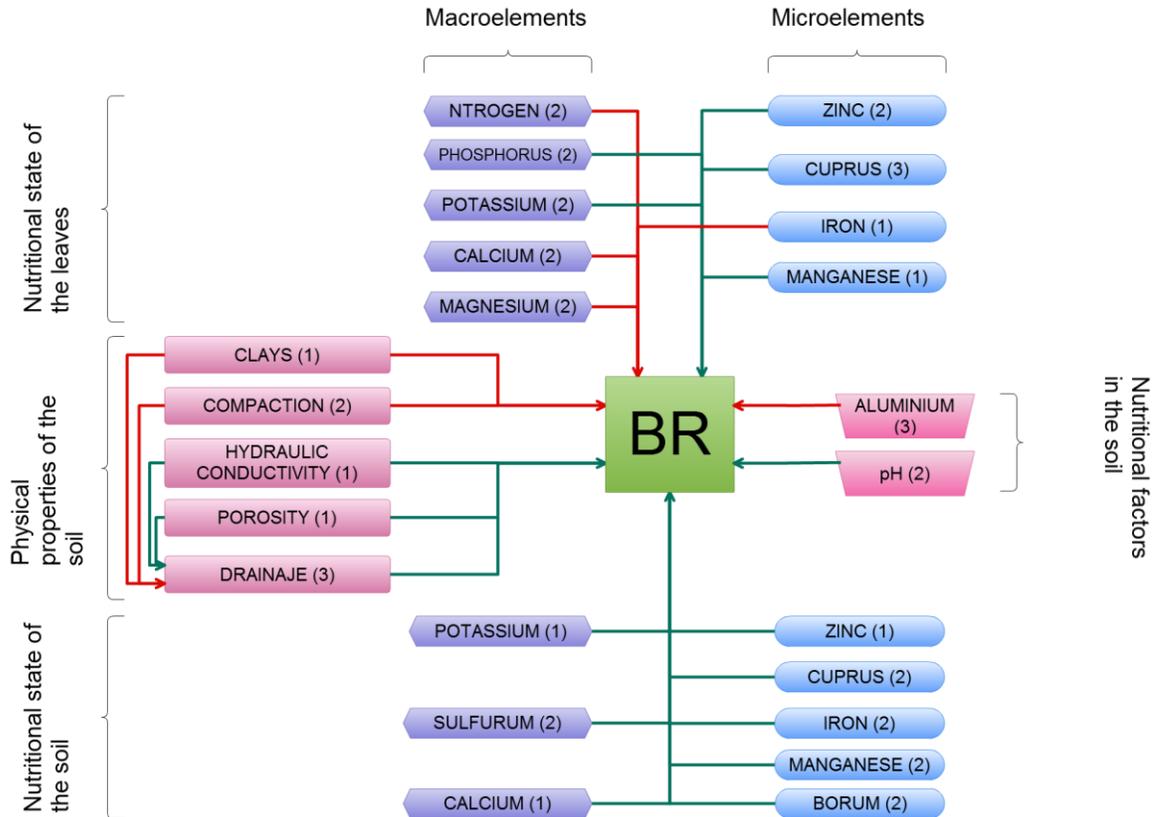


Figure 1-5: Diagram representing the studies that have been carried out on the relationship between abiotic factors and the BR disease in oil palm. Green lines indicate an inverse relationship between the factor and oil palm bud rot and red lines indicate a direct relationship. The numbers in parentheses indicate the number of authors that reported the results, which can be seen in Table 1-1.

In order to evaluate the influence of humidity on the development of epidemics, Martinez, (2010) reported that the disease has been more severe in regions with high precipitation, where the dry season is not well-defined, such as in WZ or the MMRV zone. This author noted that one or two weeks without precipitation results in a reduction in the number of lesions in the first stages of the disease, which shows that there is a relationship between precipitation and the advance of BR; however, this assertion is

not supported by any particular analysis. On the other hand, Venturieri et al. (2009), in the Pará zone of Brazil, found negative correlations between water balance and incidence of the disease when analyzing the moisture parameters with the use of geographic information systems. When the results from the biotic and abiotic approaches are compared, the first shows a major number of inconsistencies than the second. This is the reason why opportune management based on agronomic and cultivation practices, including drainage management and improvement of the soil fertility, has been the only method that has demonstrated adequate control, as has been reported for the EPZ in Colombia (Munevar, et al., 2001; Fedepalma, 2008).

Agroecological factors, such as a reduction in inoculation through the eradication of diseased palms and the presence of vectors of the Orthoptera order, have only been the object of a systematic study (Gomez, 1995; Franqueville, 2001; Martinez et al., 2008, Torres et al., 2008a; Torres et al., 2008b)).

▪ **Genetic resistance**

Advances have been slow for producing material in palm genetic breeding programs; since no protocols exist for the infection of the disease, the breeders can not clearly identify resistant geotypes. Furthermore, in the cases that have shown a possible resistance response, it could be the result of disease escape (Louise et al., 2007; Chinchilla et al., 2007). However, and despite of these disadvantages, the hybrid material *Elaeis oleifera* H.B.K. X *E. guineensis* Jacq. has been reported resistant (Amblard et al., 2004; Louise, et al., 2007; Zambrano and Amblard, 2007; Navia et al., 2014), as well as have seeds with parental sources from material of the Ekona region of the Democratic Republic of the Congo (Chinchilla et al., 2007). This resistant materials are being planted on the most affected zones, WZ and MMRV, with positive results to date. Another interesting methodology was reported by Navia et al. (2014), where they used the epidemiological approach to select for resistant materials. They calculated the disease progress rate (r) for different genetic materials and defined the resistant based on this value. However possible disease escapes can not be ruled out.

Table 1: Summary of the principal studies on the relationship between physicochemical variables of the soil with the incidence of oil palm bud rot.

Site	Author	Variable	Association with the development of BR
Foliar	Chinchilla and Durán, 1999; Acosta and Munevar, 2003	Phosphorus	-
	Chinchilla and Durán, 1999; Acosta and Munevar, 2003	Potassium	-

	Chinchilla and Durán, 1999; Vieigas et al., 2000	Zinc	-
	Vieigas et al., 2000; Chinchilla and Duran, 1999; Acosta and Munévar, 2003	Copper	-
	Vieigas et al., 2000	Manganese	-
	Chinchilla and Duran, 1999; Acosta and Munevar, 2003	Calcium	+
	Chinchilla and Duran, 1999; Acosta and Munevar, 2003	Magnesium	+
	Peña and Ruiz, 1965, cited by Gómez et al., 2000	Nitrates	+
	Chinchilla and Duran, 1999	Nitrogen	+
	Vieigas et al., 2000	Iron	+
Soil	Franqueville, 2001; Peña and Ruiz, cited by Gómez et al., 2000; Rodríguez et al., 2000: Hartley, 1965, cited by Franqueville, 2001.	Drainage	-
	Rodríguez et al., 2000	Water conductivity	-
	Acosta and Munevar, 2003	Porosity	-
	Acosta and Munevar, 2003; Silveira et al., 2001	Sulfur	-
	Silveira et al., 2001	Calcium	-
	Cristancho et al., 2007	Potassium	-
	Acosta and Munevar, 2003; Silveira et al., 2001	Boron	-
	Acosta and Munevar, 2003; Silveira et al., 2001	Copper	-
	Acosta and Munevar, 2003; Silveira et al., 2001	Iron	-

Cristancho, et al., 2007; Silveira et al., 2001	Manganese	-
Franqueville 2001; Acosta and Munevar, 2003	pH	-
Peña and Ruiz, 1965, cited by Gómez et al., 2000	Clay	+
Franqueville, 2001; Rodríguez et al., 2000.	Compaction	+
Cristancho et al., 2007; Franqueville, 2001; Acosta and Munevar, 2003	Aluminum	+

1.5 Final considerations

This situation of inconsistencies and reframes could be caused by the failure of the classic phytopathological model to answer the aetiological question, resulting in divergent approaches. Furthermore, the debate has been centered on the circumstances of the disease rather than on the analysis of experimental information.

Another factor revealed in this analysis was the little coordinated work of the research groups, within and between the institutions that decided to conduct studies on this disease. There are plantations that, due to their size, can support research infrastructure and, as a management strategy, have decided to conduct their own research, leading to a high number of studies on the disease, generating redundant studies and contradicting results, in summary, disarticulation between the research groups. The producer associations exert pressure to research institutes because the lack of convincing short-term results and demand changes in the research priorities. Research processes for this pathosystem require years to obtain results and are halted under this situation. As a result, the logic of the

studies is based on fears of imminent losses rather than on technical scientific discussion.

BR is a disease that differs in many aspects from the more well-known common diseases, including the group of diseases named by forest pathologist as declines (Chinchilla, (2011, personal communication); Manion, 1991) that has characteristics that vary from those of BR, mainly in terms of the temporal and spatial speed of propagation (Manion, 1991; Ostry, et al., 2011). However, it is plausible that a study on BR could be focused on a complex analysis scheme as proposed by Wallace, (1978) and Ostry, et al., (2011), who agreed with Franklin, et al., (1987), and Hyink and Zedaker, (1987) that this type of diseases are both, pathological and ecological problems and that, in order to establish diagnostic methods, studies must be carried out with a synoptic approach with multiple regression equations. Nevertheless, Wallace, (1978) recommended that, in order to decide whether or not to consider determinant factors of the disease, the researcher must select the more probable; in this sense, there has been a return to the statement of Sinclair (1967), as cited by Ostry, et al., (2011), who for, the declines, summarize them into three groups: predisposing factors, inciting factors, and contributing factors, which can be used as a study scheme for future research on BR.

Finally, as with decline diseases, it is clear that it is not necessary to create a group of different diseases for their classification and that the concept of a disease triangle as proposed by Ostry et al., 2011 and Scholthof, 2007 is sufficient for explaining any pathogenic process, therefore, and by way of summary, considering that the cause and effect relationship between the elements of the triangle of the disease are not being fully quantified or validated, and a comprehensive view of the problem is not undertaken, the aetiology of the disease will not

be fully understood with the consequences already seen in the devastated regions.

1.6 Literature Cited

- [1] ACEVEDO, N., Buriticá, P., García, J., and Gálvis, N. 2000. Valoración económica de las pérdidas en aceite generadas por la pudrición de cogollo en los Llanos Orientales de Colombia. *Palmas* 21(2): 53-64.
- [2] ACOSTA, A., and Munevar, F. 2003. Bud rot in oil palm plantations: Link to soil physical properties and nutrient status. *Better Crops International* 17(2): 22-25.
- [3] ALDANA, R., Aldana, J. and Moya, O. 2010. Biología, hábitos y manejo de *Rhynchophorus palmarum*. *Boletín técnico* No. 23 Cenipalma, 60 p.
- [4] ALLEN, W., Paulus, A., Van Gundy, S., Swinburne, T., Ollagnier, M. and Renard, J. 1995. Report on the mission to Ecuador. *Palmeras del Ecuador-Palmeriente* 13th-20th. Document Cirad-Cp, 99 p.
- [5] AMBLARD, P., Billotte, N., Cochard, B., Durand-Gasselin, T., Jacquemard, J., Louise, C., Nouy, C. and Potier, F. 2004. El mejoramiento de la palma de aceite *Elaeis guineensis* y *Elaeis oleifera* por el Cirad-CP. *Palmas* 25 (Especial II): 306-310.
- [6] BACHY, A. 1954. Contribution à l'étude de la pourriture du cœur du palmier à huile. *Oléagineux* 9 (8-9): 619-627.
- [7] BENÍTEZ, E. 2015. Epidemiología de la pudrición del cogollo de la palma de aceite. Tesis de doctorado, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá.
- [8] BERGAMIN, F., Amorim, L., Arenjeira, F., Berger, R. and Hau, B. 1998. Análise temporal do amarelecimento fatal do dendezeiro como ferramenta para elucidar sua etiología. *Fitopatología Brasileira* 23(3): 391-396.
- [9] BREURE, C. and Soebagjo, F. 1991. Factores relacionados con la incidencia del arco defoliado en la palma de aceite (*Elaeis guineensis* Jacq) y su efecto sobre el crecimiento y la producción. *Palmas* 12(4): 47-60.
- [10] CHÁVEZ, F. 1974. Pudrición del cogollo de la palma de aceite en Ecuador. Capítulo XII. Archivo del Departamento de Fitopatología de la Estación Experimental Santo Domingo. p. 153-170.
- [11] CHINCHILLA, C., Alvarado, A., Albertazzi, H. and Torres, R. 2007. Tolerancia y resistencia a las pudriciones del cogollo en fuentes de diferente origen de *Elaeis guineensis*. *Palmas* 28 (Especial I y II): 273-284.

- [12] CHINCHILLA, C. and Durán, N. 1998. Phytosanitary problems management in oil palm. An agronomic perspective. *Palmas* 19 (Especial): 242-253.
- [13] CHINCHILLA, C. and Durán, N. 1999. Nature and management of spear rot-like problems in oil palm: a case study in Costa Rica. Proc. of the 1999 PORIM International Palm Oil Congress Emerging Technologies and Opportunities in the Next Millennium (Agriculture), Kuala Lumpur, Malaysia, p. 97-126.
- [14] CORREDOR, A., Martínez, G. and Silva, A. 2008. Problemática de la pudrición del cogollo en Tumaco e instrumentos para su manejo y la renovación del cultivo. *Palmas* 29(3): 11-16.
- [15] CRISTANCHO, J., Castilla, C., Rojas, M., Munevar, F. and Silva, J. 2007. Relación entre la saturación de Al, Mg, K y la tasa de crecimiento de la pudrición de cogollo de la palma de aceite en la Zona Oriental colombiana. *Palmas* 28(2): 25-36.
- [16] DOLLET, M. 1991. Etiología de la pudrición de cogollo. Investigaciones virológicas conducidas por el IRHO. *Palmas* 12(2): 33-37.
- [17] DOLLET, M. 1992. Strategies used in etiological research on coconut and oil palm diseases of unknown origin. In: Plant diseases of viral, viroid, mycoplasma and uncertain etiology. K. Maramorosh. Oxford & IBH, Publishing CO. PVT. LTD., Nueva Deli, 184 p. 95-114.
- [18] DOLLET, M., Mazzolini, L. and Bernard, V. 1994. Research on viroid-like molecules in oil palm. In: Coconut improvement in the South Pacific. M. A. Foale and Lynch P.W. Ed. ACIAR Proceedings 53: 62-65.
- [19] DUFF, A. 1963. The bud rot/little leaf disease of the oil palm. *Journal of Waifor* 4(14): 176-190.
- [20] FEDEPALMA. 2007. Editorial: Enfermedades en palma de aceite: un reto a la sostenibilidad de la agroindustria. *Palmas* 28(1): 5-8.
- [21] FEDEPALMA. 2008. Editorial: Acercamiento científico a la solución del problema de la pudrición del cogollo de la palma de aceite. *Palmas* 29(3):5-6.
- [22] FEDEPALMA. 2014a. Avanza consolidación de franja sanitaria para contener la pudrición del cogollo. In: Fedepalma, <http://web.fedepalma.org/node/699>; consult: June, 2014.
- [23] FEDEPALMA. 2014b. Palmeros unidos, unión de voluntades para enfrentar la PC. In: Fedepalma, <http://palmaldia.org/xii-reunion-tecnica/consuelo> consult: December, 2014.
- [24] FRANKLIN, J., Shugart, H. and Harmon, M. 1987. Tree death as an ecological process. *BioScience* 37: 550-556.

- [25] FRANQUEVILLE, H. 2001. La pudrición del cogollo de la palma aceitera en América Latina: revisión preliminar de hechos y logros alcanzados. Publicación del Cirad p. 37.
- [26] GÓMEZ, P. 1995. Estado actual de la investigación sobre pudrición de cogollo. Palmas. 16(1): 9-24.
- [27] GÓMEZ, P., Ayala, L. and Munevar, F. 2000. Characteristics and management of bud rot, a disease of oil palm. Proc. of the International Planters Conference p. 545-553.
- [28] GHESQUIERE, J. 1935. Rapport préliminaire sur l'état sanitaire de quelques palmeraies de la province de Coquilhatville. l'Institut National pour l'étude agronomique du Congo belge, Série Scientifique 3: 37-40.
- [29] GUEVARA, A. and Nieto, L. 1999. Nematodos asociados con palmas de aceite (*Elaeis guineensis* Jacq.) afectadas con pudrición de cogollo. Palmas 20(1): 93-99.
- [30] HYINK, D. and Zedaker, S. 1987. Stand dynamics and the evaluation of forest decline. Tree Physiology 3: 17-26.
- [31] HURTADO, R., Rincón, V. and Martínez, L. 2009. Análisis exploratorio de las capturas de *Rhynchophorus palmarum* L. (Coleoptera: Curculionidae) en lotes afectados por pudrición del cogollo en la Zona Occidental palmera colombiana. Palmas 30(2): 36-50.
- [32] KOVACHICH, W. 1952. Little leaf disease of oil palm (*Elaeis guineensis*) in the Belgian Congo. Tropical Agriculture Trin. 29: 107-114.
- [33] KOVACHICH, W. 1957. Some disease of the oil palm in the Belgian Congo. W. Afr. Inst. Oil Palm Research 2: 221-229.
- [34] LOS ANGELES TIMES. Disease lays waste to Colombia oil palms In: Los Angeles Times <http://articles.latimes.com/2010/apr/07/world/la-fg-colombia-palms8-2010apr08> consult December, 2014.
- [35] LOUISE, C., Amblard, P., Franqueville, H., Benavides, D., and Gallardo, C. 2007. Investigaciones dirigidas por el Cirad sobre las enfermedades del complejo pudrición del cogollo en la palma aceitera en Latinoamérica. Palmas 28 (Especial I): 345-362.
- [36] MANION, P. 1991. Tree disease concepts. 2nd Edition. Prentice-Hall. Englewood Cliffs, New Jersey. 402 pp.
- [37] MARTÍNEZ, G., Arias, N., Sarria, G., Torres, G., Aldana, C., Martínez, C., Moya, O. and Burgos, C. 2008. Prácticas de manejo de la pudrición del cogollo (PC) de la palma de aceite. Cenipalma 12p.
- [38] MARTÍNEZ, G. and Silva, A. 2009. Plan nacional de manejo de la pudrición del cogollo Fedepalma - Cenipalma. Palmas 30(3): 97-121.
- [39] MARTÍNEZ, G. 2010. Pudrición del cogollo, marchitez sorpresiva, anillo rojo y marchitez letal en la palma de aceite en América. Palmas 31(1): 43-54.
- [40] MARTÍNEZ, G., Sarria, G., Torres, G., Varón, F., Drenth, A. and Guest, D. 2014 Nuevos hallazgos sobre la

- enfermedad de la pudrición del cogollo de la palma de aceite en Colombia: biología, detección y estrategias de manejo. *Palmas* 35(1): 11-17.
- [41] MONTES, L. and Ruiz, E. 2014. Eficacia y costo del trampeo para capturar *Rhynchophorus palmarum* (L.) usando caña de azúcar y melaza aislada. *Palmas* 35(1): 33-40.
- [42] MUNEVAR, F., Acosta, A. and Gómez, P. 2001. Factores edáficos asociados con la pudrición del cogollo de la palma de aceite en Colombia. *Palmas* 22(2): 9-19.
- [43] NAVIA, E., Ávila, R., Daza, E. and Restrepo, E. 2014. Assessment of tolerance to bud rot in oil palm under field conditions. *Eur. J. Plant Pathol.* 140(4): 711-720.
- [44] NIETO, L. 1996. Symptoms and identification of the causal agent of bud rot complex in oil palm, *Elaeis guineensis* Jacq. *Palmas* 17(2): 57-60.
- [45] NIETO, L. and Gómez, P. 1991. Estado actual de la investigación sobre el complejo pudrición de cogollo de la palma de aceite en Colombia. *Palmas* 12(2): 57- 67.
- [46] NOAA, USA.
http://www.cpc.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ensoyears.shtml (consult July 2014).
- [47] OCHOA, G. and Bustamante, E. 1979. Investigación del agente causal de la pudrición de flecha en palma africana. *Revista ICA, Colombia* 2(4): 425-433.
- [48] OSTRY, M., Venette, R. and Juzwik, J. 2011. Letter to the Editor: Decline as a Disease Category: Is It Helpful? *Phytopathology* 101(4): 404-409.
- [49] PACHECO, A., Tailliez, B., Rocha, R. and De Lima E. 1985. Les déficiences minérales du palmier à huile (*Elaeis guineensis* Jacq.) dans la région de Belém (Pará, Brésil). *Oléagineux* 40(6): 295-309.
- [50] PLOETZ, R. 2007a. Disease management in tropical perennial crops. *Palmas* 28 (Special edition, I): 326-338.
- [51] PLOETZ, R. 2007b. Diseases of tropical perennial crops: Challenging problems in diverse environments. *Plant Disease* 91(6): 644-663.
- [52] QUILLEC. G. 1983. Etude de la pourriture du cœur de Shushufindi (Equateur). Document Irho 1757, février 1983, 47 p.
- [53] QUILLEC, G., Renard J. and Ghesquière, H. 1984. Le *Phytophthora heveae* du cocotier: son rôle dans la pourriture du cœur et dans la chute des noix. *Oléagineux* 39(10): 477-485.
- [54] QUINTERO, J. 2010. Dinámica de captura de adultos de *Rhynchophorus palmarum* L. (Coleoptera: Curculionidae) en la red de monitoreo de la Zona Occidental. *Palmas* 31(4): 17-27.
- [55] RENARD, J. 1976. Diseases in Africa and South America. In: *Oil Palm Research*. R.H.V Corley, J.J. Hardon and B.J.Wood. Elsevier, Amsterdam. p. 447-466.

- [56] RENARD, J. and Quillec, G. 1984. Enfermedades destructoras de la palma africana en el África y Suramérica. *Palmas* 6(1): 9-16.
- [57] RODRÍGUEZ, T., Viegas, I., Trindade, D., Martins, E., Frazao, D. and Cordeiro, R. 2000. Influência das propriedades físicas do solo na ocorrência do amarelecimento fatal do dendezeiro. Poster, Seminario Internacional: Agronegócio do dendê: uma alternativa social, econômica e ambiental para o desenvolvimento sustentável da Amazônia. Belém, Pará, Brasil, Octubre 2000.
- [58] SARRIA, G., Torres, A., Aya, H., Ariza, J., Rodríguez, J., Vélez, D., Varón, F. and Martínez, G. 2008. *Phytophthora* sp. es el responsable de las lesiones iniciales de la pudrición de cogollo (PC) de la palma de aceite en Colombia. *Palmas* 29 (3): 31-41.
- [59] SÁNCHEZ, A. 1990. Enfermedades de la palma de aceite en América Latina. *Palmas* 11(4): 5-38.
- [60] SÁNCHEZ, N., Ayala, L., Álvarez, E. and Gómez, P. 1999. Patogenicidad, identificación y caracterización molecular de *Phytophthora* spp. en palma de aceite. *Ceniavances* 60: 1-4.
- [61] SCHOLTHOF, K. 2007. The disease triangle: pathogens, the environment and society. *Nature Reviews Microbiology* 5: 152-156.
- [62] SILVEIRA, R., Vieiga, A., Ramos, E. and Parente, J. 2001. Evolução da sintomatología do amarelecimento fatal a adubações com omissão de macro e micronutrientes. Denpasa, Belém, Brasil, 35 p.
- [63] TORRES, G., Sarria, G., Varón, F. and Martínez, G. 2008(a). Evidencias circunstanciales de la asociación de especies de la familia Tettigoniidae con el desarrollo de lesiones iniciales de la pudrición del cogollo de la palma de aceite. *Palmas* 29(3): 53-61.
- [64] TORRES, G., Sarria, G., Salcedo, S., Varón, F., Aya, H., Ariza, J., Morales, L. and Martínez, G. 2008(b). Opciones de manejo de la pudrición del cogollo (PC) de la palma de aceite en áreas de baja incidencia de la enfermedad. *Palmas* 29(3): 63-72.
- [65] TOVAR, J. 2014. Comportamiento de la enfermedad pudrición del cogollo (PC) de la palma de aceite en las plantaciones ubicadas en los Llanos Orientales colombianos. Report from: Coordinación de Manejo Sanitario Núcleos Palmeros Zona Oriental. pp. 18.
- [66] TURNER, D. 1981. Oil palm diseases and disorders. Oxford University Press, Kuala Lumpur, 280 p.
- [67] VAN DE LANDE, H. 1993. Studies on the epidemiology of spear rot in oil palm (*Elaeis guineensis* Jacq.) in Suriname. Wageningen (NLD): Landbouw Universiteit, 153 p.
- [68] VAN DE LANDE, H. and Zadocks, J. 1999. Spatial patterns of spear rot in oil palm plantations in Surinam. *Plant Pathology* 48:189-201.

- [69] VAN HALL, C. 1921. Diseases and pests of cultivated plants in the Dutch East Indies in 1920. Med. van het Inst. voor Plant. 46. 50 p. In: Imperial Bureau of Mycology. 1922. The Review of Applied Mycology 1: 18-20.
- [70] VAN SLOBBE, W. 1996. Oil palm estate denpasa & other oil palm plantings in Parana. II. Second interim report of short term consultancy on the progress of fatal yellowing disease (Amarelecimento fatal - AF). 19 August-17 November 1996, 68 p.
- [71] VARGAS, M. 1992. Fusarium solani agente causal del complejo pudrición de cogollo. Palmas 13(1): 59-67.
- [72] VENTURIERI, A., Fernandes, W., de Jesus., A. and Vasconcelos, M. 2009. Relação entre ocorrência do amarelecimento fatal do dendzeiro (*Elaeis guineensis* jacq.) e variáveis ambientais no estado do Pará. Anais XIV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Natal, Brasil, 25-30 abril 2009, INPE, p. 523-530.
- [73] VIEIGAS, I., Frazao, D., Furlan, J., Trindade, D. and Thomaz, M. 2000. Teores de micronutrientes em folhas de dendzeiros sadios e com sintomas de amarelecimento fatal. Poster presentado en el Seminario Internacional: Agronegocio do dendê: uma alternativa social, econômica e ambiental para o desenvolvimento sustentável da Amazônia. Belém, Pará, Brasil, 16-20 octubre 2000.
- [74] VILLANUEVA, A. 1988. Apreciaciones acerca del seminario internacional sobre identificaciones y control de organismos y/o factores causantes del síndrome conocido como spear rot en palma de aceite. Palmas 9(4): 37-46.
- [75] WALLACE, H. 1978. The diagnosis of plant diseases of complex etiology. Annu. Rev. Phytopathol 16: 379-402.
- [76] ZAMBRANO, J. and Amblard, P. 2007. Resultados de los primeros ensayos del cultivo de híbrido interespecífico de *Elaeis oleífera* x *Elaeis guineensis* en el piedemonte llanero Colombiano (Hacienda La Cabaña S. A.). Palmas 28 (Special edition, Vol. I): 234-24.

2. Seguimiento regional de la enfermedad mediante enfoque participativo y sistemas de información geográfico

2.1 Resumen

La PC es una enfermedad que viene afectando desde el siglo XX a los cultivos de palma en Latinoamérica y África, sus efectos sobre la productividad del cultivo varían desde la presencia de épocas improductivas de la palma, hasta inclusive la destrucción de plantaciones completas. Se buscó con este trabajo encontrar un sistema de información integral de la enfermedad, que unificara criterios, integrara a los productores, que fuera de uso libre y que permitiera identificar los patrones de avance de la enfermedad en espacio y tiempo, con los beneficios que esto implica para el manejo del problema. El estudio se realizó en el área de influencia de seis Plantas Extractoras de Aceite de Palma (PEA) en la cercanía del municipio de Puerto Wilches (Santander, Colombia). Dado el hecho que la propuesta tenía alcance regional era necesario que la comunidad del MMC participara activamente del proceso, por lo que se concibió desde el enfoque de un Sistema de Información Geográfica con Participación Pública (SIGPP). Se inició con la estandarización de los sistemas de seguimiento y registro de la enfermedad, que fue orientada a través de capacitaciones a todos los productores de la zona. En consecuencia, la generación tanto de los datos como de los criterios para su captura y análisis fue concertada y compartida con la comunidad del MMC. Luego se hizo una identificación de la

ubicación de los lotes con sistemas de posicionamiento global y se caracterizó de manera general su sistema de producción agroecológico. Todos los datos fueron cargados en un sistema SOLAP con miras a su uso por la comunidad. En total se visitaron 3057 unidades productivas comprendidas en 573 plantaciones, que cubren un área de 36626 ha, donde se registraron hasta 21 variables de caracterización agroecológica.

2.2 Introducción

La PC es una enfermedad que ha generado retos a todas las disciplinas en fitopatología: Su etiología tiene gran diversidad de teorías; los controles recomendados varían desde estrategias nutricionales hasta la erradicación de las palmas afectadas; y el impacto sobre la productividad del cultivo ha oscilado entre mínima reducción en la producción hasta la destrucción completa de regiones productoras.

Se buscó con este trabajo proponer un sistema de captura de datos de la enfermedad bajo un enfoque de Sistemas de Información Geográfica con Participación Pública (SIGPP), que permitiera establecer estudios epidemiológicos en diferentes niveles, desde palmas individuales hasta lotes, plantaciones o zona. El estudio se realizó en el área de influencia de seis PEA's en la cercanía del municipio de Puerto Wilches, Santander. Se inició con la estandarización de los sistemas de seguimiento y registro, y la difusión a través de capacitaciones a todos los productores de la zona, se ubicaron en coordenadas geográficas los centroides de los lotes y se caracterizaron algunas variables agroecológicas de los mismos. Los datos capturados se cargaron en un SIG en ambiente web, construido con base en el generador de reportes Maintask. El generador de reportes Maintask es un Sistema de Procesamiento Analítico en Línea con Componente Espacial (SOLAP). Este sistema consta de una base de datos relacional con un repositorio para bases de datos espaciales (PostgreSQL/PostGIS) de manera que en

la misma están contenidos los datos alfanuméricos y los elementos geográficos, servidor de mapas (Mapserver) y el de aplicaciones (PHP) lo que permite realizar consultas y vistas integradas entre los datos y los geodatos (<http://sigpalma.maintask.net>). Al ser una aplicación web puede ser accesible desde el navegador de internet Firefox. Con este sistema se logra de una forma económica, participativa, adaptada a la zona y de libre acceso, el manejo de los datos de la PC.

2.2.1 Enfoque

El modelo propuesto reúne varios conceptos generados en distintas áreas del conocimiento. En primera instancia se basa en el concepto de Sistemas de Soporte a Decisiones (SSD), los cuales se definen como sistemas computacionales que ayudan en el proceso de toma de decisiones (Turban, 1995). En segundo término se encuentran los Sistemas de Información Geográfica (SIG), que para el presente trabajo serán considerados como parte integral de los SSD, y estarán publicados en la internet. Por último, al ser concebido para responder a un problema a escala regional en donde el agricultor debe ser partícipe de la construcción y el manejo, se hizo uso del enfoque de un PPGIS (Stern, et al., 2009; Tung-Wen, et al., 2009; Brown y Reed, 2009).

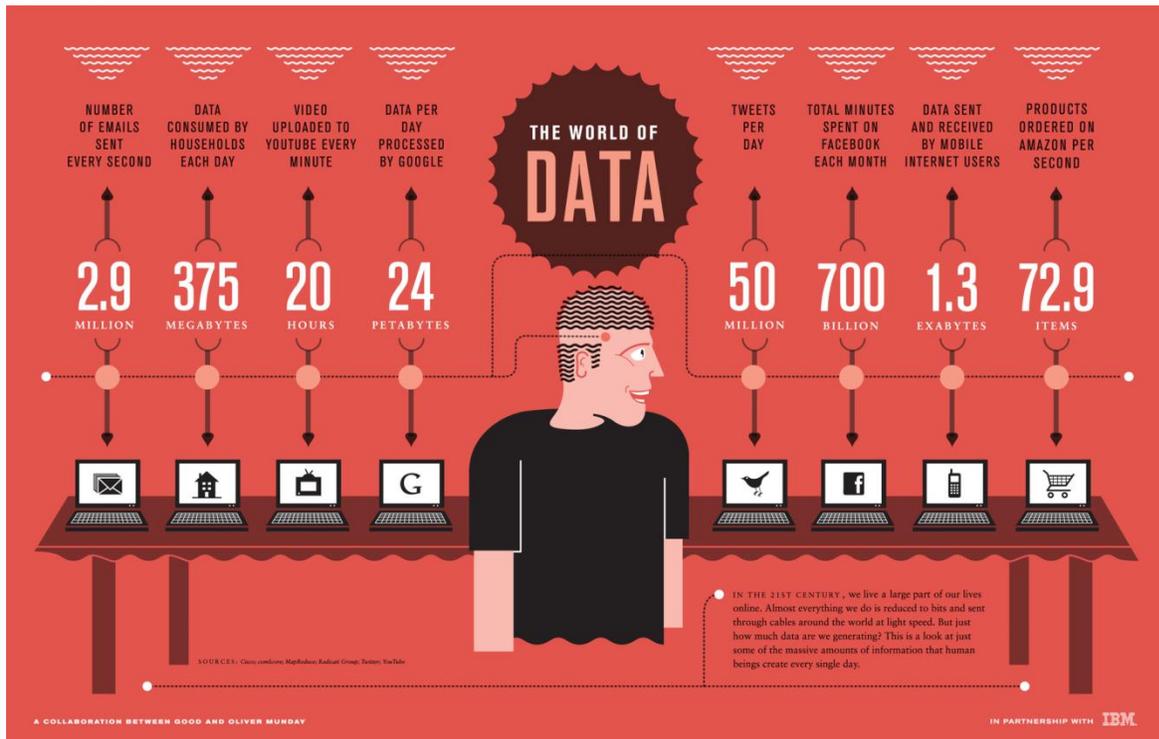
2.2.2 Sistemas de soporte a decisiones: OLAP y SOLAP

Los datos digitales han posibilitado el almacenamiento de grandes cantidades de información. La infografía presentada por IBM en 2010, Figura 2-1, muestra una aproximación a los volúmenes de datos que fluyen en línea.

Es de esperar que empresas, estados, corporaciones o cualquier usuario de la web, esté interesado en generar información a partir de estas bases de datos, sin embargo, los sistemas de información

previos a este fenómeno no estaban en capacidad de dar respuesta a esta necesidad, lo que exigió en su momento el desarrollo de metodologías de manipulación adecuadas conocidas como minería de datos (data mining). Dichas técnicas nacieron en la década de los 1980's, Hastie, et al., 2001, las define como colecciones de métodos que buscan entender y aprovechar económicamente las grandes cantidades de información que son generadas por diversas fuentes, por ejemplo, escáneres láser, boyas meteorológicas o satélites, entre muchas otras.

Figura 2-1: Infografía sobre el volumen de datos que fluye en la red

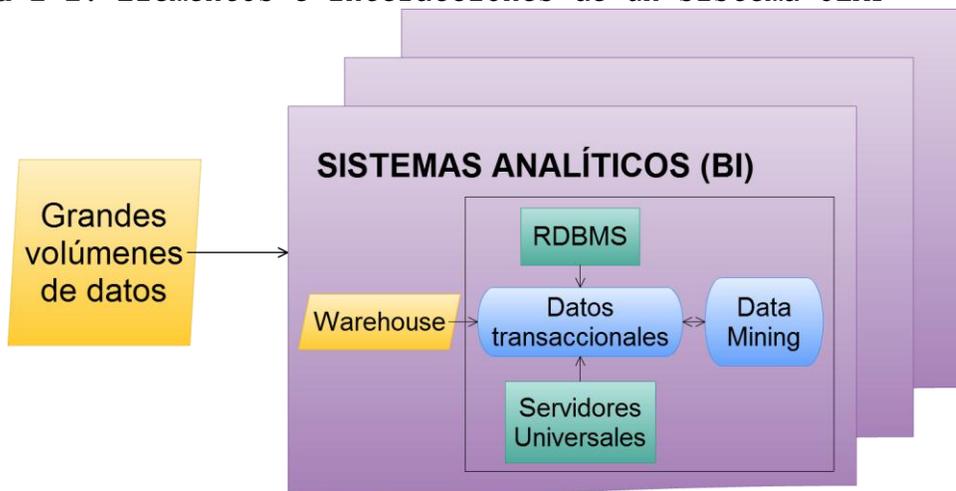


Las organizaciones antes del fenómeno de la internet, en general, habían manejado sus datos bajo esquemas transaccionales que les aseguraban la consistencia, el manejo de los fallos de recuperación y los controles de concurrencia (Dijkstra, 1959). Estas características de los datos transaccionales los hacían aptos para la construcción de sistemas confiables (Karlsen, 2003),

confiabilidad sobre la que se apoyan en la actualidad múltiples sistemas, dentro de los que se cuentan los sistemas de flujo de trabajo, sistemas móviles y sistemas basados en la web, como los propuestos para el presente estudio (Karlsen, 2003). Las bases transaccionales se soportan con Sistemas de Manejo de Bases de Datos de Relación (RDBMS) y servidores universales. La mayor parte de las aplicaciones SIG son construidas usando el enfoque transaccional (Rivest, et al, 2005). Sin embargo, la forma como se optimizaban las bases de datos desde el enfoque transaccional hacia que al tomador de decisiones se le dificultara aprovechar sus beneficios en la generación de tácticas y estrategias, es decir, resumir y agregar información; hacer comparaciones rápidas en espacio y tiempo; y sintetizar gran cantidad de eventos y descubrir sus tendencias. Dada estas restricciones en los sistemas transaccionales fue necesario desarrollar nuevos tipos de sistemas que cumplieran con estos requisitos, lo que dio inicio a lo que se ha denominado Sistemas Analíticos (Rivest, et al., 2005), estos sistemas integran al sistema transaccional las capacidades del data mining. También se les conoce con el nombre de soluciones para Inteligencia para Negocios (BI, Business Intelligence). En estos sistemas el componente central es el warehouse el cual se define como un repositorio de información integrada, disponible para búsqueda y análisis (Gupta, 1997). Es así que para los sistemas BI el warehouse se optimiza de manera que facilita análisis complejos y mejora el desempeño del uso de las base de datos cuando estas involucran miles de búsquedas (Immon, 2002, citado por Rivest, et al., 2005). Dentro de las soluciones BI, la de mayor uso han sido los sistemas OLAP (On-Line Analytical Processing), Figura 2-2. Bajo este enfoque los warehouses se estructuran en bases de datos multidimensionales organizadas conceptualmente bajo los elementos dimensión, miembro, medida, hechos y cubos de datos (Berson y Smith, 1997; AltaPlana, 2004; Pendse, 2000; y Thomsen, 2002, citados por Rivest, et al., 2005).

Estas bases de datos multidimensionales representan los temas de interés para el usuario o ejes de un espacio temático N-dimensional. Cada **dimensión** está organizada jerárquicamente en niveles de detalle; las dimensiones a su vez tienen **miembros** donde grupos de miembros se pueden agregar para formar miembros de niveles superiores; las **medidas** son los atributos numéricos analizados contra las dimensiones; cada combinación de los miembros de la medición con la medida resultante para un nivel de agregación particular representa un **hecho**; y por último, un **cubo de datos** o un hipercubo (cuando hay más de tres dimensiones) contiene los conjuntos de medidas agregadas de acuerdo con un conjunto de dimensiones. Dentro de un cubo de datos las posibles agregaciones de las medidas en las posibles combinaciones de los miembros de las dimensiones (hechos) pueden ser pre-calculadas y almacenadas con el fin de mejorar el desempeño de la búsqueda (Rivest, et al., 2005).

Figura 2-2: Elementos e interacciones de un sistema OLAP



La estructura OLAP, en general, posee tres componentes: base de datos multidimensionalmente estructurada, servidor OLAP y el cliente OLAP. El cliente OLAP le permite al usuario final utilizar diferentes gráficos y tablas. También le permite al usuario explorar y analizar los datos utilizando diferentes operadores

como el drill-down, que incrementa el nivel de detalle dentro de una dimensión; roll-up o drill-up, funciona de manera inversa del drill-down; drill-across cambia entre miembros o dimensiones al mismo nivel de detalle; swap o pivot intercambia dimensiones visibles o dimensiones ocultas y visibles, con el fin de modificar el contenido de los ejes usados en figuras y tablas; y los slice y dice que reducen la dimensionalidad de los datos (Chaudhuri y Dayal, 1997, citados por Rivest, et al., 2005).

Con el tiempo los sistemas de información se volvieron más complejos y se comenzó a dar mayor relevancia a la incorporación de geometrías espaciales a esas bases de datos (SIG, Sistemas de Información Geográfica). Sin embargo, los OLAP no eran capaces de aprovechar estas características geométricas de los warehouses espaciales y fue necesario crear un sistema que uniera las fortalezas de los SIG y de los OLAP (Bédard et al., 1997) y así nacieron los sistemas SOLAP (Spatial On-Line Analytical Processing).

Los SOLAP de manera análoga a los OLAP están constituidos por una base de datos multidimensional estructurada espacial y temporalmente, un servidor SOLAP y un cliente SOLAP. La base espacial-temporal almacena la geometría asociada con los miembros de la dimensión y las mediciones. El servidor SOLAP a su vez se compone de diferentes servidores.

2.2.3 SIG

El SIG es una metodología de análisis de datos espaciales, o asociados a una ubicación o área geográfica. Estos se caracterizan por tener herramientas de captura o digitalización de cartografía, edición, estructuración, análisis y despliegue de información apreciable a través de la cartografía, que de otra manera sería muy difícil de interpretar (Bonham, 1994).

Enfocados en el aspecto del análisis de un SIG, este debe permitir el cruce de diferentes capas de geodatos para obtener nueva información, mediante modelos o algebra de mapas (Takeyama, 1997). Un SIG permite el acceso a los geodatos de diferentes formatos de almacenamiento y diferentes sistemas de referencia geográfica, desplegándolos de manera integrada con un mínimo esfuerzo.

Sin embargo, los grandes volúmenes de geodatos, con requerimientos exigentes de hardware, se estaban convirtiendo en restricciones a su desarrollo y difusión. Por lo que la llegada de las técnicas SOLAP y la evolución de los algoritmos de compresión (Burrows y Wheeler, 1994) hicieron de estos sistemas metodologías de trabajo que han permitido que los SIG se vean en la actualidad no solo como un complemento más a los sistema de soporte a decisiones, sino que sean parte integral de ellos y que sean usados por los usuarios finales que deben tomar decisiones y no solo por los expertos que los programan.

2.2.4 PPGIS

El termino PPGIS fue concebido en 1996 en la reunión del National Center for Geographic Information and Analysis (Sieber, 2006, citado por Brown y Reed, 2009). Se define como el proceso que utiliza las tecnologías SIG para producir conocimiento que le permita a las comunidades marginalizadas su empoderamiento e inclusión (Brown y Reed, 2009; Weiner, et al., 2002). Involucran la participación de ciudadanos en la toma de decisiones públicas, promueven el fortalecimiento de las organizaciones sociales y la construcción de capital social. Se busca que las personas participen efectivamente en las decisiones públicas, se reconozcan los diferentes actores, sus intereses y propuestas, para procurar que las decisiones sean el resultado de la construcción de acuerdos y consensos (Sieber, 2002). Kingston, 2007 y Smith y Craglia, 2003, también proponen a los PPGIS como un mecanismo para

la comunicación de problemas asociados a localidades a usuarios no técnicos.

Los PPGIS se caracterizan por los siguientes elementos:

- Tienen mapas en cualquier forma (son espaciales);
- Los datos, la ubicación de los participantes y los temas dependen de la escala;
- Dependiendo de quien ejerce el control se da la oportunidad de ofrecer una decisión transparente en el proceso de toma de decisiones;
- Trata de superar algunas de las críticas sobre GIS (Pickles, 1998): ¿Esto es verdadero? ¿Se ha alcanzado esto o es demasiado temprano? ¿Éticamente hemos incluido al usuario GIS en el proceso?

No obstante, uno de los principales problemas a los PPGIS es que en este método las reuniones interactivas pueden ser alienantes e intimidantes para personas que no están acostumbradas a dichos ambientes (Involve, 2005), lo cual reduce la capacidad de participación de la comunidad.

Existen diferentes modelos de participación pública que dependen de la forma como la comunidad participa o de la generación de la información o de la toma de las decisiones Figura 2-3 (Arnstein, 1969; Davidson, 1998; Weiner, et al., 2002). Estos modelos no son lineales ni evolutivos, dependen del que ejerce el control determinar a qué nivel quiere llevar la participación. Además de estos esquemas se rescata que no todos los procesos que involucran a la comunidad son participativos, la participación implica cesión de poder del que lo tiene hacia la comunidad a la que va dirigido.

Se debe tener en cuenta el grado de motivación que se puede esperar de un sistema de este estilo dependerá de la escala a la que se trabaje, en la medida que el sistema sea más general, la posibilidad de que una proporción mayor de la población participe disminuye, Figura 2-4.

Figura 2-3: Modelos de participación pública, donde se detalla el nivel de participación dependiendo del nivel de empoderamiento que se le delega a la comunidad en la toma de decisiones.
 a) Escalera de Arnstein, 1960; b) Rueda de Davidson, 1998.

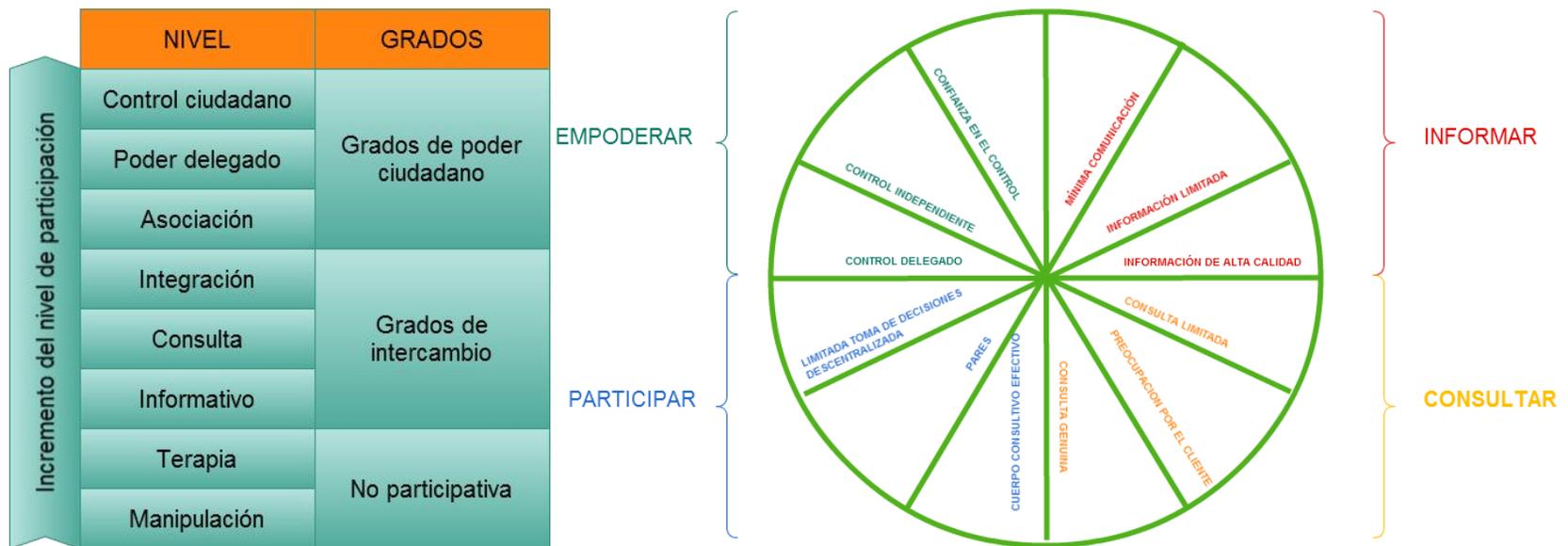


Figura 2-4: Relación entre la escala geográfica y la proporción de la población que está dispuesta a participar.



2.3 Materiales y Métodos

2.3.1 Ubicación

Este estudio se concentró en la Zona Central Palmera ubicada en el MMC. En esta misma la epidemia con sus características más devastadoras inició en los primeros años de la década de 2000. Muestra una sintomatología similar a la reportada para los departamentos de Meta y Nariño, pero su impacto sobre la producción solo es comparable con las altas pérdidas en Nariño.

2.3.2 Unidades de evaluación

Para este trabajo la unidad de evaluación mínima inicialmente fue de palmas individuales, pero el manejo de estos volúmenes de datos bajo las restricciones de infraestructura de internet hizo que se debería cambiar a una unidad en jerarquía superior, la cual fue definida a nivel de lote.

2.3.3 Modelo participativo de trabajo

Se consideró que el éxito del trabajo dependía del grado de compromiso de la comunidad palmera de la zona, por lo tanto fue necesario iniciar con planes de sensibilización del problema a todos los productores, Figura 2-5. En dichas capacitaciones se mostraron fotografías de la enfermedad, métodos y formatos de seguimiento, se realizaron salidas a campo para reconocimiento de síntomas y se les informó sobre las resoluciones de manejo de PC que habían sido promulgadas por el Instituto Colombiano Agropecuario (ICA) como la resolución 3698 de 2007, que obliga a los productores de palma a hacer seguimiento a la enfermedad. El objetivo fue hacer que los agricultores asumieran la responsabilidad del manejo de la enfermedad desde la construcción de las bases de datos hasta la priorización de los controles que

se recomendaban. En este sentido el modelo de participación buscó un nivel de empoderamiento o de grados de poder ciudadano bajo el esquema de Rueda de Davidson o de Arnstein, respectivamente, Figura 2-3.

Figura 2-5: Capacitaciones a productores de palma de aceite asociados a diferentes Plantas Extractoras de Aceite de Palma de la zonas aledañas a Puerto Wilches.



2.3.4 Datos capturados

Para efectos de seguimiento y análisis la sintomatología definida se presenta en la Figura 2-6, los cuales corresponden a diferentes manifestaciones de la enfermedad. Para asegurar el proceso de captura de datos se contó con el visto bueno del ICA quien delegó en el equipo de trabajo funciones de vigilancia sanitaria, lo que evitó que los propietarios impidieran el acceso a las plantaciones.

Para la construcción del catastro de las plantaciones y la caracterización agroecológica de los lotes de las plantaciones

visitadas se diseñaron formatos de registro que contenían las variables de las Tablas 2-1 y 2-2. También se registraba si los residuos de cosecha se manejaban o no con un sistema denominado **Calle Palera**, el cual hace referencia a dejar de manera alternada calles de cosecha y calles para depositar los residuos.

Para las variables de geometría espacial las coordenadas geográficas fueron tomadas en los centroides aproximados del lote. En los casos donde existía levantamientos topográficos de las plantaciones los centroides fueron estimados utilizando el programa <http://maps.google.com/>. Para los que no se tenía esta información los centroides fueron tomados con GPS Garmin®.

Este programa de seguimiento de la enfermedad se extendió a toda la comunidad afectada durante los años 2008 y 2009, en la zona MMC, en la cual colindan los departamentos de Santander, Cesar, Magdalena y Antioquia.

Figura 2-6: Sintomatología asociada a pudrición de cogollo en palma de aceite: a) Cogollo mostrando pudrición; b) Disección de una palma afectada, donde se muestra la profundidad de la lesión; c) Palma en proceso de recuperación luego de ser atacada por la enfermedad; d) Palma en estado avanzado de la enfermedad; e) Corte transversal, donde se muestra la profundidad de la lesión; f) Fotografía aérea de un foco de palma; g) Sintomatología asociada a los estados iniciales de la enfermedad; h) Colapso del cogollo por pudrición en su base; i) Palma en recuperación; j) Detalle de una palma reiniciando la producción de flechas.

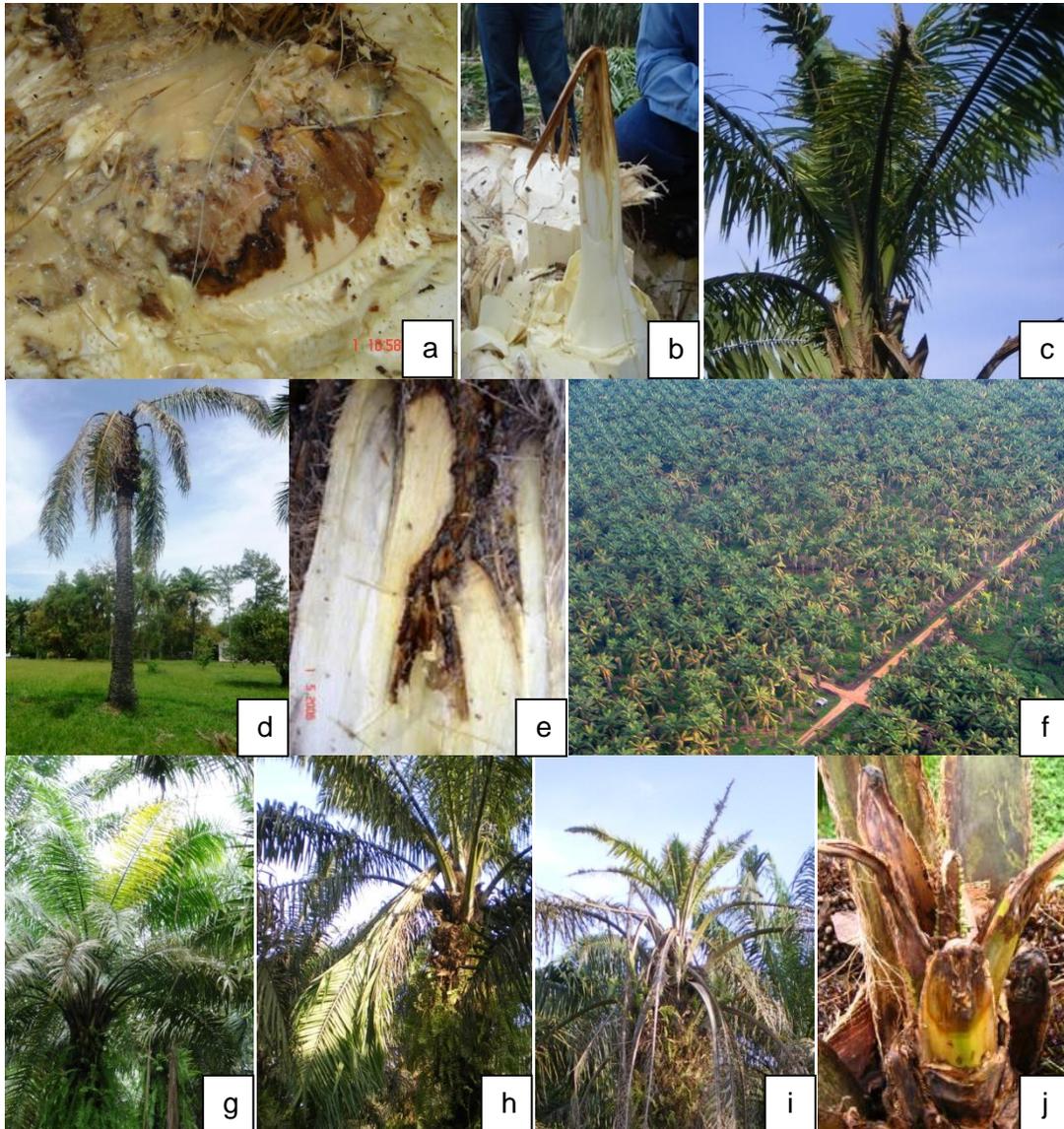


Tabla 2-1: Variables registradas en plantaciones de palma de aceite para la construcción del catastro de la zona.

Variable	Valores
PEA a la que vende el producto	Bucarelia
	Brisas
	Monterrey
	San Fernando
	Extractora Central
	Palmeras de Puerto Wilches
Propietario	Nombre
Nombre de la finca	Nombre
Administrador	Nombre
Código plantación	Desde 10001
Lote	Nombre
Código lote	Desde 5001
Variedades sembradas	Nombre
Año de siembra	Año
Hectáreas sembradas	ha
Palmas sembradas	Número
Coordenada Norte	WGS84
Coordenada Occidente	WGS84

Tabla 2-1: (Continuación)

Variable	Escala	Descripción	
		Grado	Fotografía
Encharcamientos	0	No hay evidencias	
	1	Pocas evidencias	
	2	Muchas evidencias	
	3	Totalmente inundado	

Tabla 2-1: (Continuación)

Variable	Escala	Descripción	
		Grado	Fotografía
Fuentes de agua	0	Ninguna	
	1	Algunas	
	2	Varias	
	3	Abundantes	

Tabla 2-1: (Continuación)

Variable	Escala	Descripción	
		Grado	Fotografía
Bosques circundantes	0	Ninguno	
	1	Algunos	
	2	Varios	
	3	Muchos	

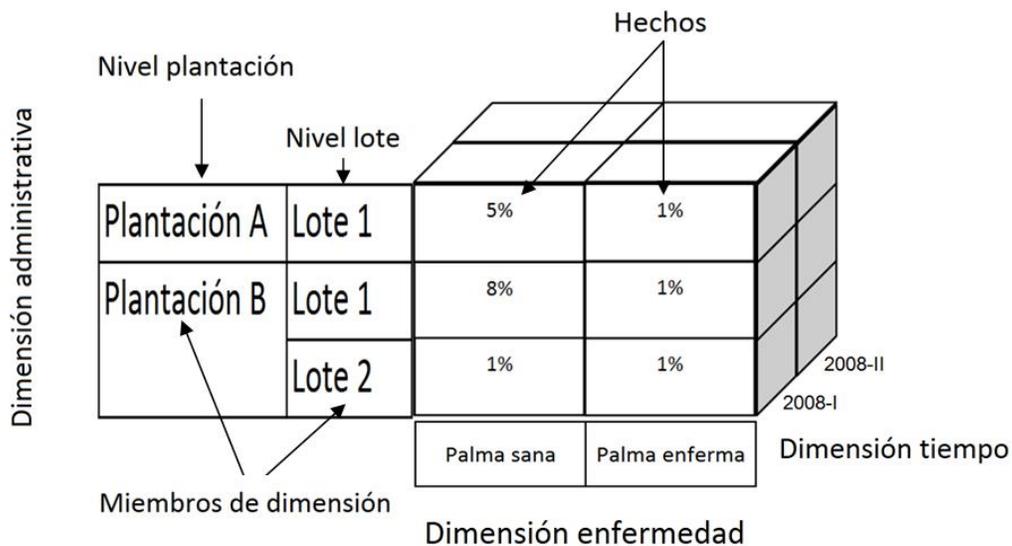
Tabla 2-1: (Continuación)

Variable	Escala	Descripción	
		Grado	Fotografía
Nutrición	0	Mala	
	1	Regular	
	2	Buena	
	3	Excelente	

2.3.5 Sistema SOLAP

Para este trabajo, en la Figura 2-7 se muestra un diagrama resumido de la estructura del cubo OLAP, donde se muestra la organización de las mediciones de la enfermedad en tres dimensiones: tiempo, estado y ubicación.

Figura 2-7: Diagrama que representa un cubo multidimensional OLAP resumido para SIG de la enfermedad pudrición del cogollo en palma de aceite en el Magdalena Medio colombiano.



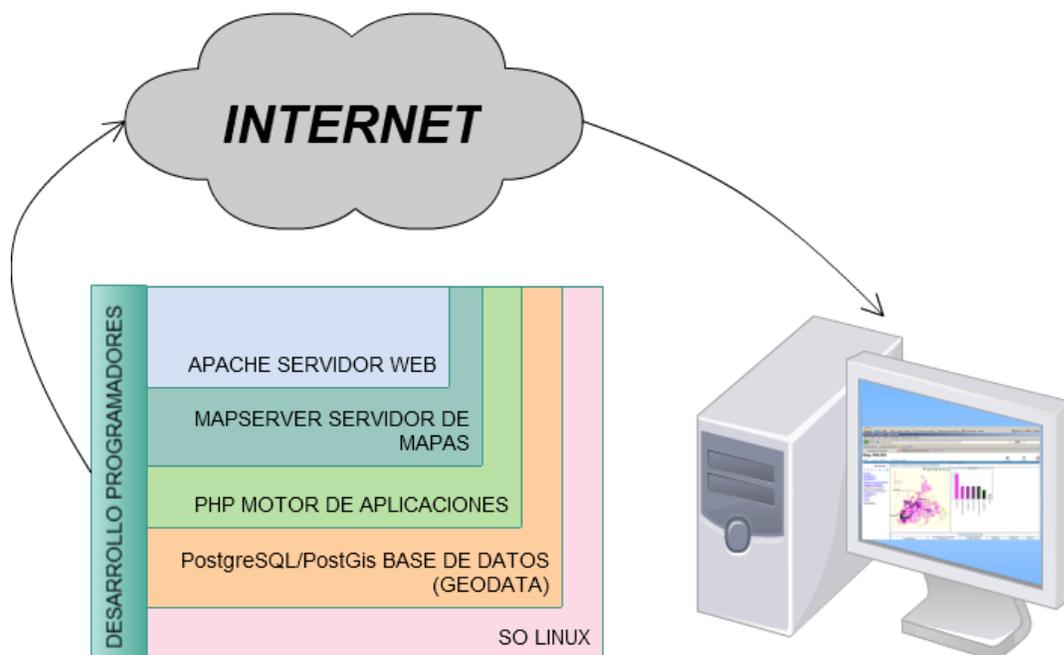
Para el presente estudio se trabajaron con los siguientes servidores: MapServer para mapas, Apache para la web, PostgreSQL/PostGis para las bases de datos (Momjian, 2001, Ramsey, 2007) y PHP para crear la aplicación del lado del cliente. MapServer puede manejar datos vector y raster, y traducir hasta 20 formatos de vectores diferentes (Kropla, 2005). MapServer puede operar en dos modos diferentes: MapScript y CGI: en modo CGI, MapServer funciona en un ambiente de servidor web como un script CGI, de esta forma es fácil ajustar y producir aplicaciones rápidas y sencillas; en el modo MapScript es accesible desde Perl, Python y PHP (Personal Home Pages o Hypertext PreProcessor)

(Kroppla, 2005), tal como se implementa en el presente trabajo y de esta forma sirve como lenguaje de programación que ejecuta el MapServer antes de enviar la información al navegador. Dentro de las ventajas de PHP esta su portabilidad en los servidores Apache e IIS, su distribución libre y su buen desempeño en mantener la integridad de los datos (Molinares, et al., 2004). PHP es junto a ASP (Active Server Pages) los dos lenguajes de programación de este tipo más extendidos en internet (Rodríguez, 2004, Alshanetsky, 2010). Por último, los clientes SOLAP son los que permiten el desplazamiento entre los **hechos**, es decir, navegar. Dentro de las alternativas de clientes SOLAP se tiene Jmap Spatial OLAP, OLAP para Arcgis, SAS OLAP, Mondrian SOLAP y SOLAP MaintTask el cual fue el empleado en este proyecto por facilidad y rapidez en la implementación.

El formato de almacenamiento de geodatos en base de datos se orientó de acuerdo con las normas establecidas por el Open GIS Consortium (OGC, 2011), lo que ayudó a garantizar la interoperabilidad de los sistemas. Dichas normas abarcan tópicos como los sistemas de referencia espacial, los elementos geográficos simples y servicios de mapas WMS y GML, dentro de las más destacadas.

En la Figura 2-8 se muestra un esquema de la forma como se organizó el SOLAP y como este se interconecta con la internet y de ahí con el usuario final.

Figura 2-8: Esquema de la estructura del SIG-WEB <http://sigpalma.maintask.net>



2.4 Resultados y discusión

El proyecto inició en diciembre de 2007 con un grupo de PEA's y plantaciones del MMC y a partir de noviembre de 2008 se consolidó en el proyecto MIRE-PC (Manejo Integrado Regional de la pudrición del cogollo) (Silva y Martínez, 2009). El cual evolucionó a lo que es en la actualidad el **Plan Nacional de Manejo de la Pudrición del Cogollo**, liderado directamente por Fedepalma (Federación Nacional de Cultivadores de Palma) (Silva y Martínez, 2009; Cabra, 2011). Esta gerencia está adscrita a la Presidencia de Fedepalma y, en las regiones, es direccionada y articulada por el comité de gerentes de plantaciones de cada zona.

Con el apoyo de las gerencias de las PEA y a través de la Fundación Fruto Social de la Palma, entidad sin ánimo de lucro creada con fondos de los productores para apoyar a las comunidades palmicultoras en diferentes aspectos de crecimiento y desarrollo social, se inició el aporte de recursos a todos los productores de la zona a través del cobro directo a la venta de fruto.

2.4.1 Área evaluada

En total se visitaron 573 plantaciones, las cuales agruparon a un total de 3057 unidades productivas (lotes), cubriendo un área de 36626 ha. La mediana tanto del área de los lotes como de las plantaciones fue de 10 ha. Sin embargo, la variabilidad fue muy diferente pues el CV para lotes alcanzó el 72% mientras que para las áreas totales de plantaciones este subió a 443% Figura 2-9 y Figura 2-10.

Estos resultados muestran que para el MMC la distribución de las áreas de predios tiende a ser de pequeños productores con clases modales de 10 ha, y que las grandes plantaciones de más de 1000 ha son un porcentaje muy bajo de todo el universo de plantaciones visitadas. Este resultado ayuda a entender el cambio del paradigma que las plantaciones de palma ya no son representadas por grandes áreas de producción perteneciente a pocos dueños, sino que, por el contrario, cerca del 90% del área sembrada son cultivos con menos de 50 ha.

Figura 2-9: Histograma de la distribución de los tamaños de las unidades productivas de palma de aceite (lotes) en el Magdalena Medio Colombiano.

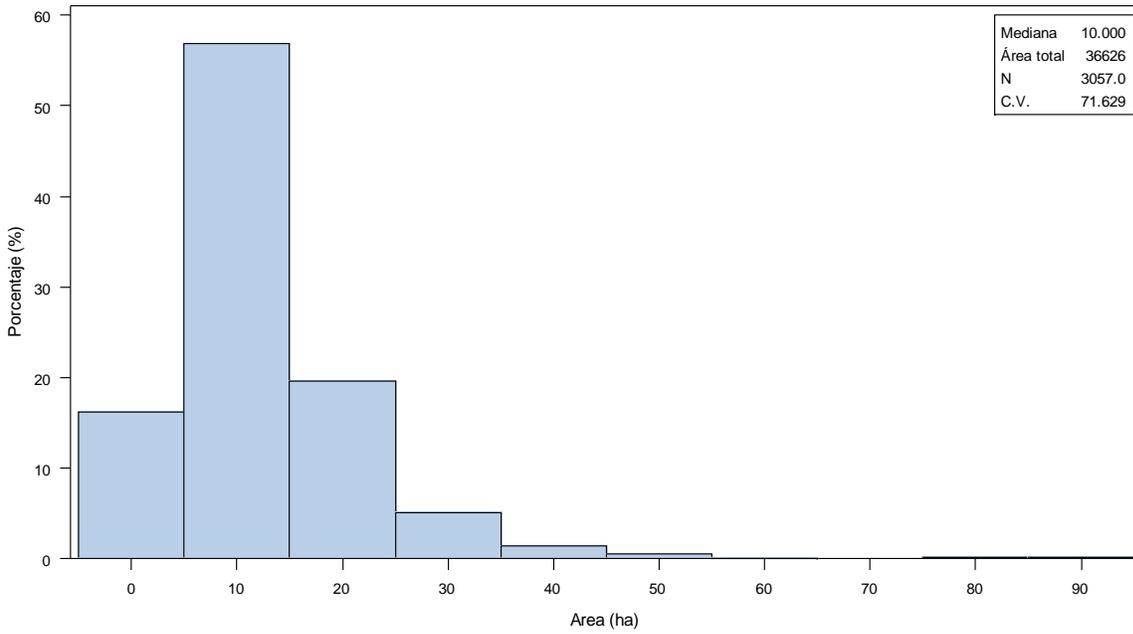
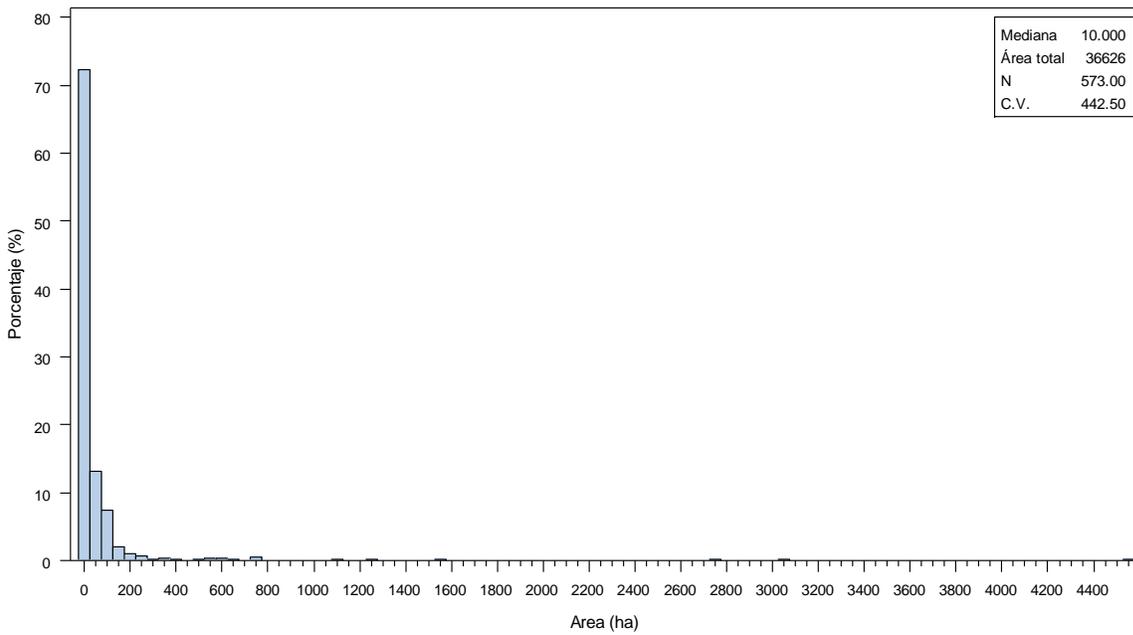


Figura 2-10: Histograma de la distribución de los tamaños de las plantaciones de palma de aceite en el Magdalena Medio Colombiano.



2.4.2 Participación de la comunidad

En cuanto a las capacitaciones, que fueron teórico-prácticas, en la Tabla 2-3 se describe en detalle el número de asistentes por cada una de las extractoras que participó en el proyecto.

Tabla 2-2: Descripción del número de capacitaciones hechas sobre manejo de la enfermedad pudrición del cogollo en palma de aceite discriminadas entidad que convocaba en la zona del Magdalena Medio colombiano.

Entidad que convoca	Participantes
Palmas Oleaginosas Bucarelia	53
Palmas Monterrey	86
Palmeras de Puerto Wilches	77
Oleaginosas Las Brisas	107
Agroince	101
Extractora Central	89
Palmas del Cesar	19
Extractora San Fernando	32
Colegios Agropecuarios de la zona	220
Total	784

En la parte teórica de las capacitaciones se hizo énfasis sobre el plan de manejo regional, su funcionalidad, conceptos básicos sobre la pudrición de cogollo, identificación en campo, registro de datos, y estrategias de control de la enfermedad y de los insectos asociados. Se instruyó sobre como un evaluador de la enfermedad debe orientarse para identificar la posición de las palmas afectadas sobre el estándar de líneas y palmas dentro de líneas en cada lote.

Esto hizo que a escala regional se creara conciencia de la importancia de la enfermedad, independiente si se tenían palmas sintomáticas o no, y condujo a que todas las 573 plantaciones adoptaran algún plan de manejo de la enfermedad, ya sea preventivo o curativo, el cual se evidencia que, sin excepción, todos los productores tenían al menos un reporte del estado de la enfermedad en el cultivo.

La periodicidad de las evaluaciones presentó una gran variedad de frecuencias, desde evaluaciones quincenales hasta evaluaciones semestrales, por tal razón los periodos utilizados para el registro en el sistema fueron consolidados a nivel semestral.

2.4.3 SOLAP

Antes de iniciar el proyecto, las plantaciones no tenían ningún plan concreto para manejo de la enfermedad, fue con este trabajo que se iniciaron planes de seguimiento, toma de decisiones y aplicación de controles.

Los datos capturados a partir de la información provista por la comunidad, que se describe en los párrafos anteriores fueron cargados en las bases de datos del SOLAP utilizando el modelo de entidad relación presentado en la Figura 2-11.

Lo que se presenta en este reporte de resultados solo es una parte de los avances logrados, es necesario mencionar que además se evaluaron diferentes formas de carga de datos: PDA's (Personal Digital Assistant), archivos planos, además de ampliar las funcionalidades del sistema para la carga de capturas del insecto *R. palmarum* y otros problemas sanitarios del cultivo y de esta forma darle más versatilidad al sistema, con mira a modelos de predicción, tal como lo propone Campbell y Madden, 1990, quienes para asegurar el éxito en el uso de tales sistemas recomiendan el cumplir con siete requisitos: confiabilidad, sencillez, para

enfermedades importantes, aplicables, asequibles, multipropósito y de costo razonable.

El servidor de aplicaciones es arrendado de un servidor Maintask de 10 Gb, con salida de 4 Gb y RAM de disco duro de 180 Gb.

Como resultado final del SIG-WEB el lector puede dirigirse a la dirección web <http://sigpalma.maintask.net>, ingresar el usuario: ERBS, y la clave: coed655. Así podrá navegar y construir diferentes vistas de la información cargada en la página. Una muestra de las alternativas que se pueden revisar está en la Figura 2-12. La clave ingresada tiene los privilegios más altos por lo que tiene autorización a todas las funcionalidades del sistema de información.

Figura 2-11: Modelo entidad-relación para el SIG-WEB adaptado para el seguimiento de la enfermedad pudrición del cogollo de palma de aceite en la zona del Magdalena Medio Colombiano.

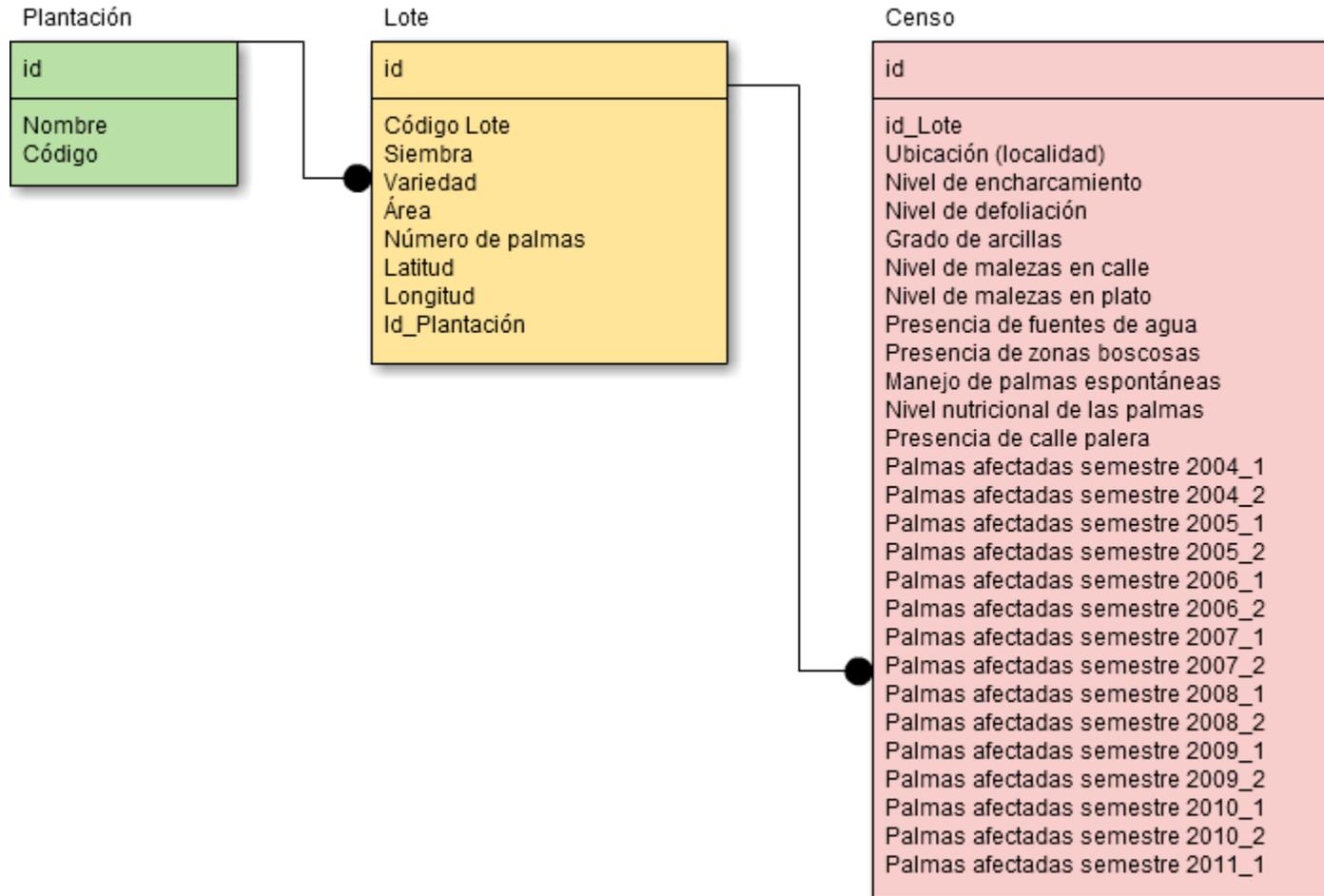
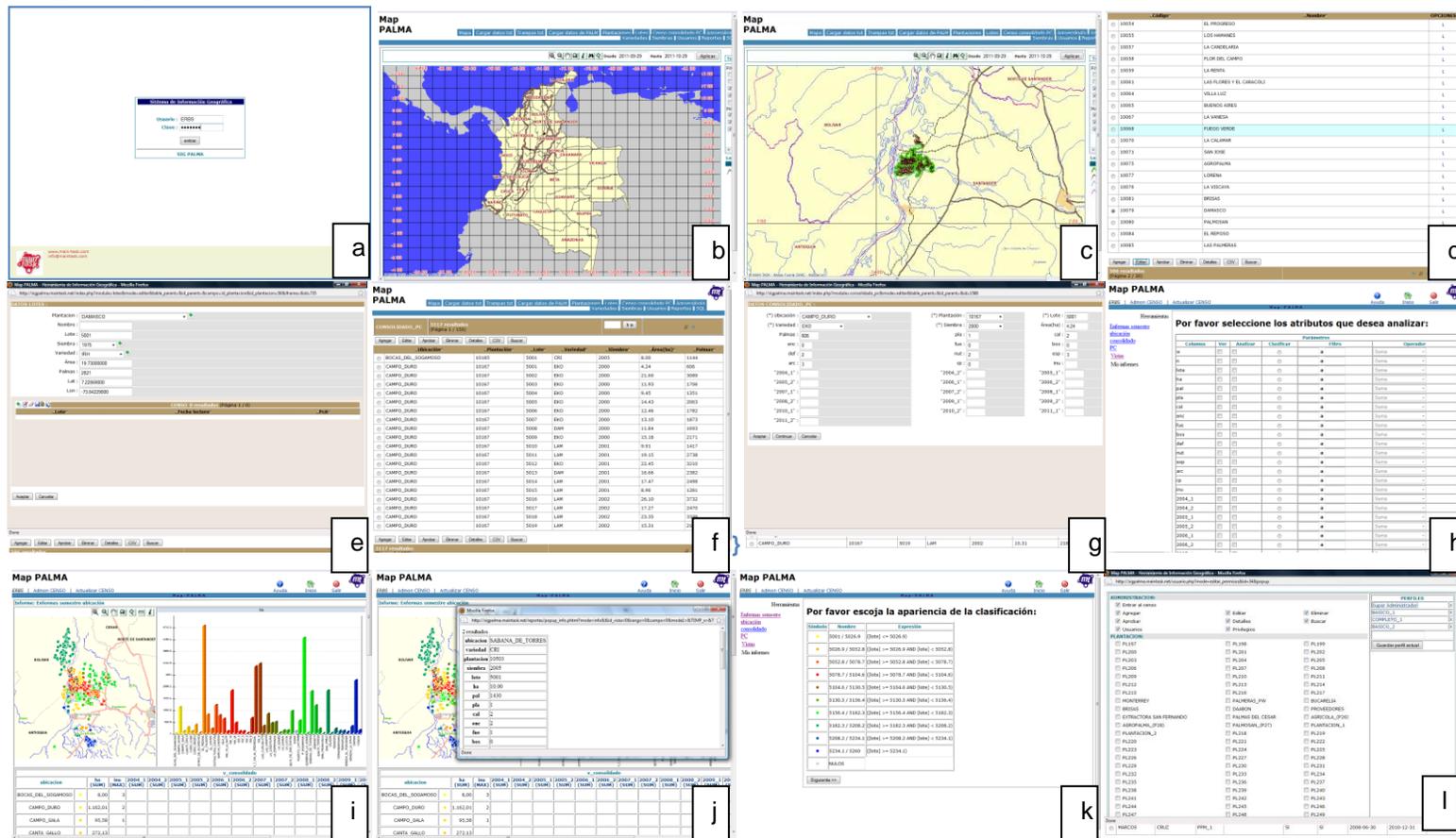


Figura 2-12: Imágenes en pantalla de la pagina web <http://sigpalma.maintask.net>. En donde se observan los diferentes pasos para: ingresar a ella y las alternativas de manejo de bases de datos y presentación de información. a) Pagina donde se muestran los campos en donde se ingresa el usuario y la contraseña; USUARIO: ERBS; CLAVE: coed655. b) Pagina inicial luego de ingresar a la página donde se muestran diferentes pestañas en desarrollo y el mapa de Colombia. c) Detalle ampliado del mapa de Colombia disponible en el sistema; d) Hoja de las plantaciones; e) Formulario de edición de la base de plantaciones; f) Hoja de lotes; g) Formulario de edición de la base de lotes; h) Formulario para creación de las vistas disponibles para despliegue de información; i) Vista del número de palmas afectadas donde se detalla la localización en colores y el número de palmas afectadas por semestre; j) Información de uno de los puntos accesible desde la imagen del mapa; k) Formulario de uno de los pasos para la creación de las vistas; y l) formulario de edición de privilegios de los usuarios.



2.5 Consideraciones finales

La alta fragmentación de la propiedad palmera en el MMC ha ocasionado que el palmicultor sea ineficiente en el manejo sanitario de los problemas del cultivo, pues traslada el concepto de propiedad privada al manejo de plagas y enfermedades, y aplica las estrategias de control a su predio sin considerar la influencia que él tiene sobre sus vecinos o que sus vecinos tienen sobre él. Es de esta forma que la visión regional del manejo de enfermedades ayuda a romper estos esquemas de trabajo y le demuestra al agricultor que la responsabilidad del manejo sanitario es una labor comunitaria y participativa. Al observar un problema sanitario en un mapa, los productores identifican rápidamente los patrones agroecológicos de las plagas y en consecuencia las discusiones sobre responsabilidad e inversión de recursos se simplifican.

El enfoque dado a este trabajo buscó darle poder a la comunidad, pues la capacidad del estado y del gremio es limitado en cuanto a la difusión e implementación de recomendaciones de manejo, si los agricultores ubicados en áreas geográficas particulares no están convencidos de la importancia del consenso para la ejecución de controles poco se puede hacer para obligarlos, y esto trae como consecuencia que las enfermedades y las plagas logren fragmentarse pues se presentan diferenciales de las dinámicas espaciales y temporales, generadas por la heterogeneidad en los manejos. Esta condición ha sido documentada para otros tipos de poblaciones naturales en las cuales la fragmentación sirve como mecanismo de sobrevivencia (Harrison y Taylor, 1997; Laine, et al., 2011), donde se configuran como poblaciones de poblaciones o metapoblaciones y así aseguran su supervivencia a pesar de las presiones de extinción que se apliquen sobre ellas.

Entonces, proyectos como el presentado en este trabajo se convierte en coordinadores de actividades y facilitadores de la comunicación regional. Delegan en el productor la mayor parte de la responsabilidad y ganan autoridad, desde la perspectiva intuitiva del manejo, y eventualmente, desde la aplicación de instrumentos creados por la misma comunidad a través de leyes y resoluciones.

Es de esperar que este proyecto, de acuerdo con los intereses específicos de la región, se incorpore a otros esquemas de manejo de bases de datos y sirvan de insumo para la conformación y operación de las UAATAS (Unidades Asistencia y Auditoria Técnica, Ambiental y Social) las cuales son instrumentos reconocidos por el sector para enfrentar retos ambientales, productivos y técnicos (Palmas, 2009) y evolucionen hacia sistemas participativos (Weiner, et al., 2002), altamente empoderados y con alto control de la comunidad.

El uso de estos tipos de sistemas son poco documentados para el país, e inclusive para el área fitopatológica son inexistentes. De hecho fue a partir de este trabajo que el centro de investigaciones de Fedepalma (Cenipalma), inicia trabajos bajo este enfoque con miras a utilizarlos como instrumentos para manejo y no solo como labor descriptiva del problema.

El avance de las tecnologías de comunicación es rápido. Recién se inició el proyecto las capacidades de comunicación vía internet eran escasas y lentas, luego de tres años los avances en esta área permiten que la implementación de estas tecnología sean más sencillas y funcionales, además, el acceso a páginas web como la presentada en este trabajo se vuelve más versátil, y en consecuencia los tomadores de decisiones cuentan con información más precisa, exacta y oportuna.

Por último, la funcionalidad del SOLAP Maintask ha sido probada en otros sistemas de información durante más de seis años (<http://reportes.coordenadaurbana.com/login.php>), lo que da garantía de estabilidad y adopción, en sistemas similares de captura y análisis de datos.

2.6 Literatura Citada

- [1] Alshanetsky, I. (2010). PHP Advent, Usage Statistics, <http://phpadvent.org/2010/usage-statistics-by-ilia-alshanetsky>; consulta: junio de 2011.
- [2] Arnstein, A. (1969). A ladder of citizen participation. *Journal of the American Planning Association*, 35(4): 216-224.
- [3] Bédard, Y., Larrivée, S., Proulx, M., Létourneau, F. y Caron, P. (1997). Étude de l'état actuel et des besoins de R&D relativement aux architectures et technologies des data warehouses appliqués aux données spatiales. Research Report for National Defence Canada Centre for Research in Geomatics, Laval University.
- [4] Bonham-Carter, G. (1994). Geographic information systems for geoscientist: modeling with GIS. (13). Elsevier. 398p.
- [5] Brown, G. y Reed, P. (2009). Public Participation GIS: A new method for national forest planning. *Forest Science*, 55(2):166-182.
- [6] Burrows, M. y Wheeler, D. (1994). A Block-sorting Lossless Data Compression Algorithm. SRC Research Report, (124): 24p.
- [7] Cabra, J. (2011). Avances en el Manejo Sanitario de la Palma de Aceite en Colombia: organización, tecnología, aplicación, gestión de recursos. Trabajo presentado en el XXXIX Congreso Nacional de Cultivadores de Palma de Aceite. XXXIX Asamblea General de afiliados a Fedepalma. XXI Sala General de Cenipalma. Agosto, Santiago de Cali.
- [8] Campbell, C. y Madden, L. (1990). Introduction to Plant Disease Epidemiology. Jhon Wiley and Sons, New York.
- [9] Davidson, S. (1998). Spinning the wheel. *Planning*, 1462: 14-15
- [10] Dijkstra, E. (1959). A note on two problems in Connexion with Graphs. *Numerische Mathematik*, (1): 269-271.

- [11] Gupta, H. (1997). Selection of views to materialize in a data warehouse. *Lecture Notes in Computer Science*. 1186: 98-112.
- [12] Harrison, S., y Taylor, A. (1997). Empirical evidence for Metapopulation dynamics. En: Hanski, I. y Gilpin, M. (Eds). *Metapopulation biology: Ecology, genetics, and evolution*. Academic Press.
- [13] Hastie, T., Tibshirani, R. y Friedman, J. (2005). *The elements of statistical learning: Data Mining, Inference and Prediction*. Springer Science Business Iviedia. inc., 27(2): 83:85.
- [14] IBM. (2010). The world of data, <http://awesome.good.is/transparency/web/1009/the-world-of-data/flat.html>; consulta: octubre de 2011
- [15] Involve (2005) *People and Participation: How to Put Citizens at the heart of Decision-Making*, Involve, London. <http://www.sp.gov.tr/documents/People-and-Participation.pdf>; consulta: julio de 2011.
- [16] Karlsten, R. (2003). An adaptative Transactional System - Framework and Service Synchronization. *Lectures Notes in Computer Science*. 2880: 1208-1225.
- [17] Kingston, R. (2007). Public Participation in Local Policy Decision-making: the role of Web-based Mapping. *The Cartographic Journal*, 44(2): 138-144.
- [18] Kropla, B. (2005). *Beginning Mapserver: open source GIS development*. Apress, 417p.
- [19] Laine, A., Burdon, J., Dodds, P. y Thral, P. (2011). Spatial variation in disease resistance: from molecules to metapopulations. *Journal of Ecology*, 99(1): 96-112.
- [20] Molinares, D., Alcocer, A. y Rojas, C. (2004). Análisis comparativo de las herramientas de programación Web: PHP, ASP, JSP, bajo los sistemas operativos Linux y Windows. *Ingeniería & Desarrollo*. 16:104-115.
- [21] Momjian, B. (2001). *PostgreSQL: Introduction and Concepts*. Pearson Education Corporate Sales Division (800): 382-3419.
- [22] OGC. (2011). Open Geospatial Consortium, <http://www.opengeospatial.org/ogc>; consulta: Octubre de 2011.
- [23] Palmas. (2009). Editorial: Unidades de Asistencia y Auditoría Técnica, Ambiental y Social (UAATAS): Una estrategia para el manejo sanitario y para incrementar la productividad y competitividad palmera. 30(3):5-6.
- [24] Pickles, J. (1998). Arguments, Debates, and Dialogues: The GIS-Social Theory Debate and Concerns for Alternatives.

-
- En: P. Longley, M. Goodchild, D. Maguire y D. Rhind (eds.). (pp. 49-60). Geographical Information.
- [25] Ramsey, P. (2007). The state of open source GIS. Refrations Research inc. Victoria, BC, Canada. 49 p.
- [26] Rivest, S., Bédard, Y., Proulx, M.J., Nadeau, M., Hubert, F. y Partor, J. (2005), SOLAP technology: Merging business intelligence with geospatial technology for interactive spatio temporal exploration and analysis of data. ISPRS Jorunal of Photogrammetry and Remote Sensing, (60): 17-33.
- [27] Rodríguez, J. (2004). PHP-Nuke: software de código abierto en la gestión de contenidos web, <http://www.elprofesionaldelainformacion.com/contenidos/2004/noviembre/6.pdf>; consulta: octubre de 2011.
- [28] Sieber, R. (2002). Geographic Information Systems in the Environmental Movement. En: Weiner, et al. (eds): Community participation and geographic information systems. P. (pp. 153-172). Taylor & Francis.
- [29] Silva, A. y Martínez, G. (2009). Plan Nacional de Manejo de la Pudrición del Cogollo Fedepalma - Cenipalma. Palmas. 30(3): 97-121.
- [30] Smith, S. y Craglia, M. (2003) Digital Participation and Access to Geographic Information: A Case Study of Local Government in the United Kingdom, URISA Journal, 15(II).
- [31] Stern, E., Gudes, O., y Svoray, T. (2009). Web-Based Traditional Public Participation Comprehensive Planning: A Comparative Study. Environment and Planning B, 113-134.
- [32] Takeyama, M. (1997). Building spatial models within GIS through Geo-Algebra. Transactions in GIS, 2(3): 245-256.
- [33] Tung-Wen, M., Tsai, Y., Shih, M. y Yu-Wen, J. (2009). Public Participation and the Concept of Space in Environmental Governance: An Application of PPGIS. Public Admin. Dev. 29: 250-261.
- [34] Turban, E. (1995). Decision support and expert systems: management support systems. Englewood Cliffs, N.J., Prentice Hall.
- [35] Weiner, D., Harris, T. y Craig, W. (2002). Community participation and geographic information systems. En: Weiner, et al. (eds): Community participation and geographic information systems. P. 3-16. Taylor & Francis.

3. Modelo espacial y temporal de PC

3.1 Resumen

A partir de los datos capturados del este proyecto se implementaron diversas metodologías de análisis estadístico con el fin de identificar patrones espaciales y temporales de la enfermedad que permitieran reproducir matemáticamente su comportamiento a través de modelos de predicción en tiempo y espacio. Para las evaluaciones temporales el comportamiento de las epidemias fue adaptado a los modelos epidemiológicos clásicos, los cuales luego de inspecciones de correlación de concordancia e independencia de residuales se ajustaron en mayor medida al modelo gompertz. Para los aspectos espaciales se utilizaron técnicas geoestadísticas, aplicadas a las tasas de desarrollo de la enfermedad y al intercepto del modelo gompertz, para las tasas se encontraron correlaciones espaciales anisotrópicas con rangos entre 1 y 4 km, asociados a dos direcciones 60° y 165° , respectivamente. Los rangos más altos coinciden con mayor prevalencia de vientos diurnos. Las predicciones kriging de los interceptos se asociaron con el patrón de inicio de la epidemia el cual se sitúa entre las ciénagas de Montecristo y Corredor, ubicadas al norte de la desembocadura del río Sogamoso en el Magdalena. En cuanto a la asociación de las variables agroecológicas y la enfermedad se implementaron técnicas de Análisis Exploratorio de Factores (AEF), usando rotaciones oblicuas promax, y ortogonales varimax, las cargas factoriales de este último tipo de rotación fueron utilizadas para la estimación de modelos de pronóstico vía mínimos cuadrados lineales, los cuales identificaron como variables explicativas de la enfermedad

a las variables nivel de defoliación, nivel de malezas en calle de cosecha, evidencias de encharcamiento, nivel de arcillas, uso de calle palera y predisposición por deficiencia de cobre y cinc; también aparecen relacionados los macroelementos calcio, magnesio y azufre, sin embargo, su alta correlación con variables agroecológicas hace que su efecto no sea claro sobre el proceso patogénico.

3.2 Introducción

La variable enfermedad es la más importante en el seguimiento de una epidemia, como lo afirma Campbell y Madden, 1990, en ella se resumen todos los elementos del proceso patogénico: Ambiente, planta y patógeno. Esto hace que la descripción de sus patrones en tiempo y espacio sea uno de los temas de trabajo más comunes en fitopatología y en especial en epidemiología. La velocidad en la que se instala y los patrones espaciales que muestra en campo es información útil para la toma de decisiones tanto en investigación como en producción.

Para atender a la necesidad de estimación y predicción de estos efectos se han desarrollado e implementado varias metodologías de investigación, tomando como apoyo mucho del acervo de conocimientos de la estadística y de las matemáticas. Los primeros trabajos realizados formalmente en esta área los realizó Vanderplank, 1963, luego del cual gran cantidad de autores han complementado sus aportes y criterios de aplicación (Campbell y Madden, 1990 y Madden, et al., 2007). No obstante, los aportes de Vanderplank se limitaron a la dimensión tiempo y fue necesario que otros autores iniciaran la exploración de metodologías que evaluaran la evolución de las enfermedades en el espacio, donde los trabajos de Chellemi et al., 1988, en técnicas geoestadísticas

o el enfoque a través de Índices de Distancia (SADIE), (Perry, 1995), merecen ser destacados.

Es claro que los modelos propuestos no atendían a evaluar relaciones de causalidad entre factores y solo buscaban caracterizar la enfermedad en poblaciones que cambian en tiempo y espacio. Así fue como se dio paso al uso de las técnicas de regresión vía mínimos cuadrados ordinarios (MCO) al análisis epidemiológico, sin embargo, el uso de estas técnicas requieren el cumplimiento de varios supuestos que no son satisfechos por las variables medidas sobre la enfermedad (independencia de las variables explicativas, independencia de los residuales, distribución normal de residuales, homogeneidad de varianzas o linealidad de los parámetros). Esta situación ya había sido identificada por varios autores en epidemiología humana y como respuesta ya habían adaptado varias técnicas estadísticas para resolver los problemas mencionados, es así que desde finales del siglo pasado se ha visto como cada vez más la evaluación de enfermedades en plantas aprovecha adopciones metodológicas hechas por su contraparte en medicina (Nutter, 1999; Pethybridge et al., 2009).

3.2.1 Tasas de desarrollo

Los dos puntos de mayor discusión en el análisis de datos epidemiológicos temporales son los de linealidad de la variable de respuesta y el de independencia de las observaciones temporales. En la búsqueda de soluciones la primera respuesta se dio con la adopción de modelos de progreso intrínsecamente lineales: exponencial, gompertz, monomolecular y logístico, que tienen la propiedad que luego de ciertos tipos de transformación se convierten en modelos lineales en los parámetros, Tabla 3-1. Para el segundo problema de independencia de los residuales, el cual de por sí es una contradicción fitopatológica, pues las evaluaciones de una enfermedad en el tiempo debe ser dependientes, se salva

momentáneamente con la selección de modelos que reduzcan la aparición de residuales correlacionados (Campbell y Madden, 1990; Neher, et al., 1997; Madden et al., 2007).

Tabla 3-1: Modelos linealizados y no linealizados evaluados para las epidemias de pudrición del cogollo de palma de aceite.

Modelo	Forma lineal	Forma no lineal
Exponencial	$Y_1 = \ln(Y)$	$Y = \exp[\ln(\hat{Y})]$
Monomolecular	$Y_1 = \ln\left(\frac{1}{1-Y}\right)$	$Y = \frac{\exp(\hat{Y}) - 1}{\exp(\hat{Y})}$
Logístico	$Y_1 = \ln\left(\frac{Y}{1-Y}\right)$	$Y = \frac{\exp(\hat{Y})}{\exp(\hat{Y}) + 1}$
Gompertz	$Y_1 = -\ln[-\ln(Y)]$	$Y = \exp(-\exp(-\hat{Y}))$

Además de utilizar el criterio de reducción de dependencia de residuales en la selección del modelo de avance, se recomienda el cálculo de estadísticas que midan el ajuste de los datos predichos para cada modelo estimado contra los valores reales. Este proceso lo recomiendan con la evaluación de un análisis de regresión entre los datos observados y los predichos (Campbell y Madden, 1990; Neher et al., 1997; Madden et al., 2007), sin embargo, el uso de técnicas de regresión para este tipo de análisis cada vez es menos recomendado (Lin, 1989; Lin et al 2002) y se opta por la estimación de estadísticas específicas que midan el grado conformidad entre los datos predichos y los reales de acuerdo con el nivel de medida, Figura 3-1. Estas estadísticas que evalúan la concordancia entre grupos de datos han sido diseñadas para valorar la cercanía a estándares ya sean de procesos, metodologías o formulaciones en diversos procesos: desempeño de laboratorios, validación de ensayos o instrumentos, control estadístico de la calidad, bondad de ajuste y bioequivalencia (Lin et al., 2002). Para el caso de incidencia, medido como porcentaje, el Coeficiente de Correlación de Concordancia (CCC, ρ_c) (Lin, 1989; Lin et al 2002), es la alternativa más ajustada para la evaluación de los

datos de la enfermedad predichos por los modelos y comparados con los valores reales.

El CCC permite cuantificar la exactitud y la precisión de los modelos respecto a sus pronósticos (Lin, 1989; Nita et al., 2003), mediante la siguiente Ecuación:

$$\rho_c = r \times C_b \quad (3-1)$$

Donde r es el coeficiente de correlación de Pearson que cuantifica la precisión de la conformidad y C_b mide el sesgo o la cercanía de los datos con la línea de concordancia:

$$C_b = \frac{2}{(v + (1/v) + u^2)} \quad (3-2)$$

En esta fórmula el componente v mide la diferencia entre las pendientes de las dos líneas, si las pendientes son iguales, v es igual a 1. u , de otra parte, mide los cambios de posición del intercepto por diferencias en altura de la línea los datos, cuando las alturas son iguales u será igual a 0. Cada uno de ellos se obtiene mediante las siguientes fórmulas:

$$v = \frac{\sigma_1}{\sigma_2} \quad (3-3)$$

Donde σ es la desviación estándar, y μ corresponde a la media de la serie de datos. El subíndice 1 se asigna al valor estimado y el subíndice 2 se asigna al valor de real.

$$u = \frac{(\mu_1 - \mu_2)}{\sqrt{\sigma_1 \times \sigma_2}} \quad (3-4)$$

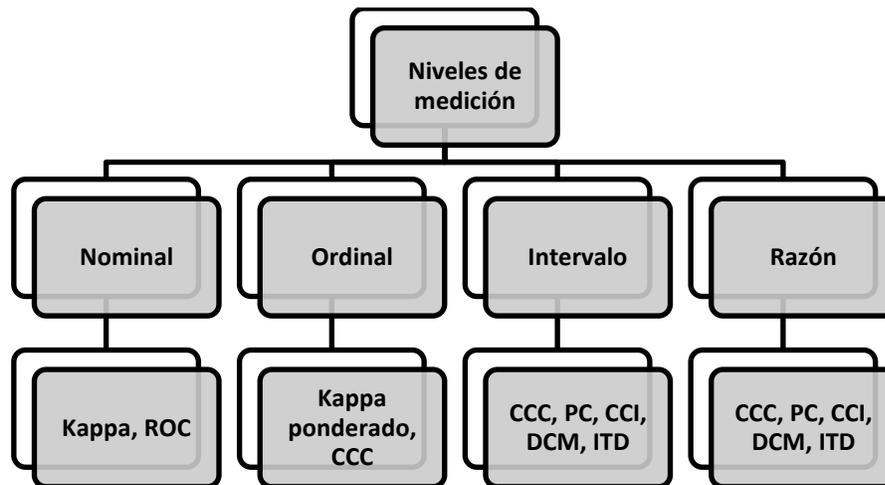
Para realizar inferencias sobre estos coeficientes se considera que la aproximación normal está definida por la transformación inversa tangente hiperbólica o transformación Z (Lin, 1989):

$$\hat{Z} = \tanh^{-1}(\hat{\rho}_c) = 0.5 \ln \left(\frac{1+\hat{\rho}_c}{1-\hat{\rho}_c} \right) \quad (3-5)$$

Y su varianza es:

$$\sigma_Z^2 = \frac{1}{n-2} \left[\frac{(1-\rho^2)\rho_c^2}{(1-\rho_c^2)\rho^2} + \frac{2u^2(1-\rho_c)\rho_c^3}{(1-\rho_c^2)^2\rho} - \frac{u^4\rho_c^4}{2(1-\rho_c^2)^2\rho^2} \right] \quad (3-6)$$

Figura 3-1: Métodos de evaluación de concordancia de acuerdo con los niveles de medición: Kappa y curvas ROC para variables nominales; kappa ponderado y coeficiente de correlación de concordancia (CCC) para variables ordinales; y coeficiente de correlación de concordancia, índice total de desviación (ITD), probabilidad de cobertura (CP), coeficiente de correlación intraclase (CCI) y desviación cuadrada media (DCM), para variables de intervalo y de razón (Lin et al., 2002).



3.2.2 Análisis multivariado

Dentro de las técnicas de pronóstico de enfermedades en plantas el análisis de regresión sigue siendo una de las más utilizadas, solo hasta hace algunos años se ha incursionado con otros tipos de

metodologías, Haigaung y Ma, 2011, citan análisis discriminante, redes neuronales, pronósticos de markov, componentes principales y modelos grey de pronóstico. Sin embargo, en estos tipos de metodologías, a excepción del análisis discriminante, el objetivo se centra en el ajuste del modelo antes que en la explicación del mismo. Y de esta forma se consiguen modelos altamente probables pero poco informativos.

El uso del análisis de regresión ha sufrido grandes cambios desde su aparición en el siglo XIX, principalmente buscando superar las restricciones que genera su uso cuando los supuestos sobre los que se construyó no son satisfechos. Las violaciones a los supuestos más trabajadas son las de independencia de residuales, independencia de las variables explicativas, variables explicativas fijas, distribución normal de residuales y homogeneidad de varianza. Dentro de estos supuestos se puede destacar la necesidad que las variables explicativas sean independientes, también conocida como multicolinealidad, bajo estas condiciones, las estimaciones de los parámetros de estas variables y sus errores estándar pueden presentar grandes sesgos que eventualmente oculten o muestren falsas relaciones entre las variables dependientes y las independientes. Una de las alternativas para corregir esta violación a este supuesto es construir nuevas variables que reúnan la información de variables altamente correlacionadas o dependientes, tales metodologías pertenecen al campo del análisis multivariado. En este grupo de metodologías multivariadas se pueden enumerar dos alternativas construidas para la reducción de dimensiones de un grupo de variables: Componentes Principales (CP) y Análisis Exploratorio de Factores (AEF).

3.2.3 Componentes principales

El objetivo de esta técnica es convertir un grupo de variables en un número más pequeño de variables artificiales o componentes. Los

componentes que retengan la mayor cantidad de información pueden ser utilizados como insumo para análisis que requieran que las variables evaluadas sean independientes unas de otras, como en el caso de análisis de regresión. El procedimiento de reducción se basa en la existencia de redundancia en las variables medidas. Las variables redundantes se reúnen en componentes que conservan la mayor proporción de la varianza observada. En la Figura 3-2 se observa como operan el análisis de CP con un ejemplo en donde dos variables que mostraban correlación entre ellas, al ser modificados sus ejes de referencia hacen que la asociación desaparezca y solo quede el grado de variabilidad de cada una de ellas, o valor propio. Al final cada una de las observaciones es convertida a combinaciones lineales de ponderaciones de las variables observadas.

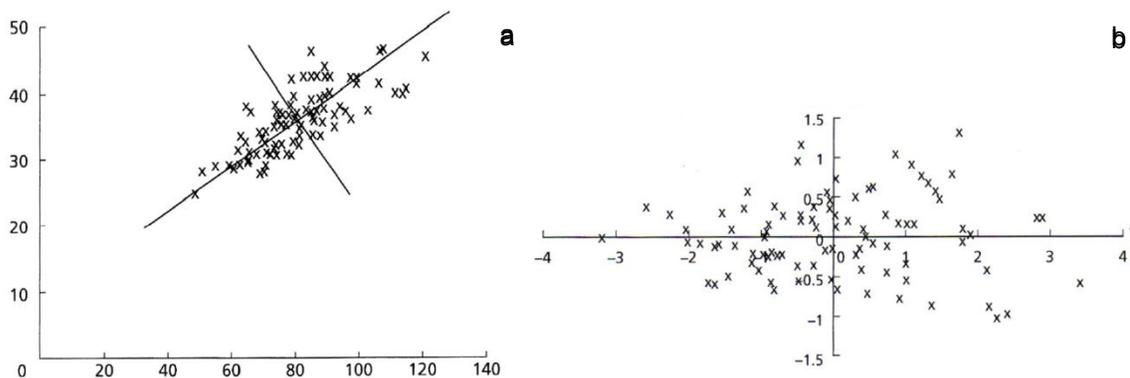
$$C_1 = b_{11}(X_1) + b_{12}(X_2) + \dots + b_{1p}(X_p) \quad (3-7)$$

C_1 = Puntaje de la observación en el componente principal 1

b_{1p} = Coeficiente de regresión (o peso) para la variable observada p

X_p = Puntaje de la observación en la variable observada p

Figura 3-2: Rotación de variables para eliminar dependencia entre ellas a través de análisis de componentes principales. a) Variables en abscisas y ordenadas con la escala original mostrando asociación positiva; b) Variables rotadas donde se observa que la rotación elimina la dependencia entre estas dos variables y solo se conserva la variabilidad de cada una de ellas.



En un análisis de componentes principales el número de componentes depende del número de variables analizadas, sin embargo, solo los primeros componentes extraídos son los que retienen la mayor cantidad de la varianza. El primer componente extrae la máxima cantidad de la varianza total (al menos esta correlacionado con alguna variable). El segundo componente retiene la varianza que no fue tomada por el primero y es independiente del primero componente. Esta metodología hace además que las variables se estandaricen a una media de cero y una varianza de uno, por lo que la suma de las varianzas será igual al número de variables. En consecuencia, las variables que presenten mayor correlación entre sí (componentes principales), acumularán más de una unidad de varianza.

3.2.4 Análisis exploratorio de factores

La otra técnica para reducción en la dimensión de variables a CP es el AEF, que en ocasiones se confunde con el de CP. Pues los cálculos y los pasos metodológicos son similares, sin embargo, los objetivos buscados son diferentes. Para CP el objetivo es solo reducir el número de variables a unos pocos CP que retengan la mayor cantidad de información de los datos originales, en AEF se busca identificar el número y la naturaleza de la estructura de los datos a través de la estimación de variables latentes o factores. Si en CP la ponderación de las variables daba el componente, en AF la ponderación del factor explica la variable, Figura 3-3. Estas ponderaciones de los factores a las variables cuando son traducidas en términos de varianza se denominan comunales.

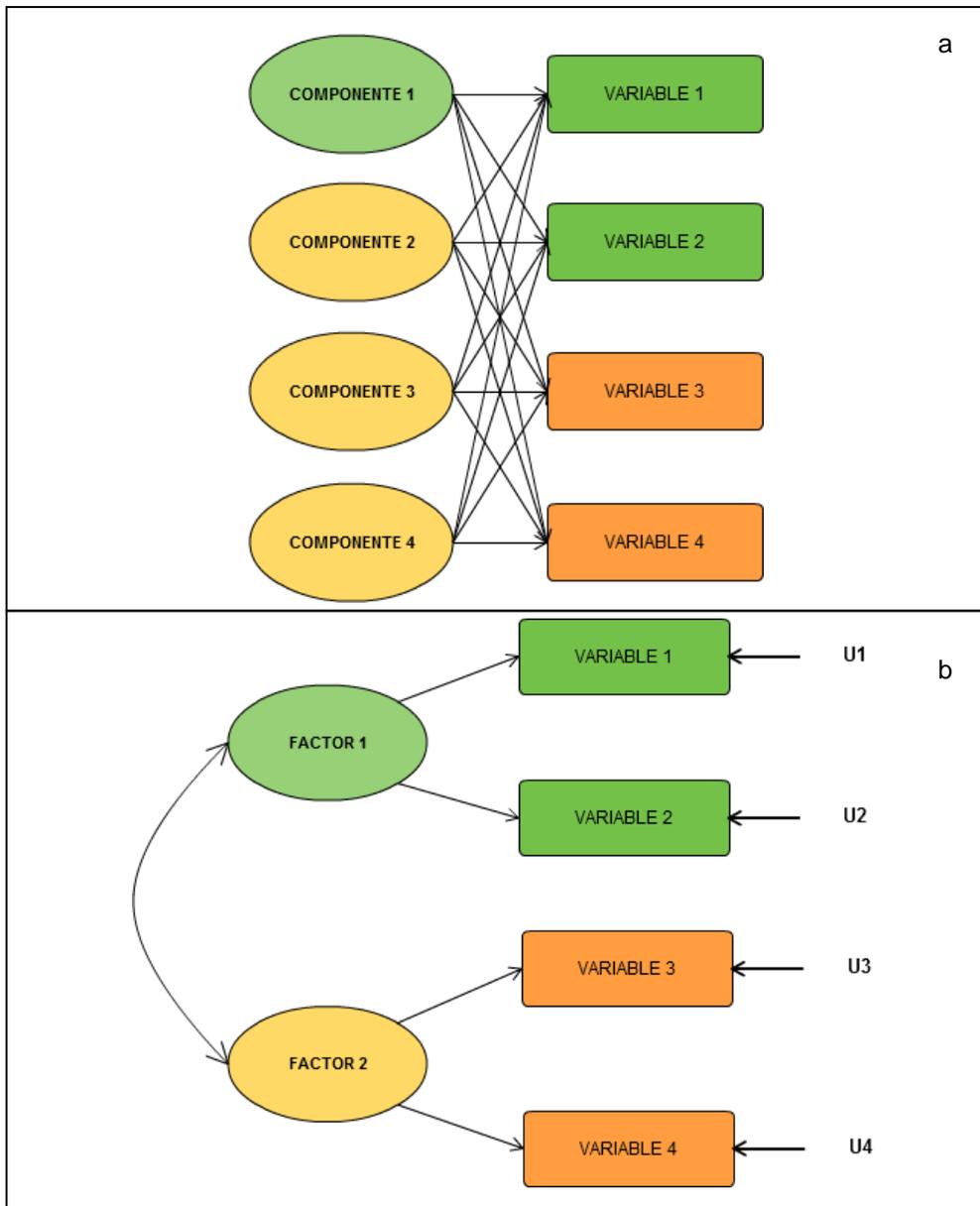
Una de las restricciones de estos tipos de metodologías es el alto uso registros, autores recomiendan tener al menos 100 con cinco veces el número de variables a analizar (variables latentes). No

obstante, si se espera que las comunalidades sean altas en pocos componentes es posible pensar en tamaños de muestra inferiores (Hatcher, 1994).

En general, se mencionan tres pasos para la estimación de los puntajes tanto para CP como para AF: a) Extracción inicial de componentes o factores; 2) componentes a conservar, al menos deben retener una unidad de varianza, en conjunto no pueden retener menos del 70% de la varianza total y de manera individual su aporte no puede ser inferior al 5%; 3) los resultados deben ser interpretables desde el enfoque del técnico que evalúa el análisis, (Hatcher, 1994).

En el caso que se espere correlación entre las variables latentes el AEF permite hacer una rotación oblicua de los factores, esta propiedad es útil no solo para este análisis exploratorio sino también para análisis más complejos como el de análisis de ruta (Hatcher, 1994).

Figura 3-3: Comparación entre las técnicas de componentes principales y exploratorio de factores. a) Análisis de componentes principales donde las variables explican el componente y solo se seleccionan los primeros componentes asociados a un grupo más pequeño de variables; b) Análisis exploratorio de factores donde se observa que el factor es el que explica las variables y que los factores seleccionados son menos que el número de variables originales.



3.2.5 Modelos estadísticos espaciales

El uso de la estadística en la cuantificación de la relación espacial de las enfermedades de plantas cultivadas se inició con la clasificación de la distribución de las plantas enfermas en los patrones al azar y agregado, siendo el agregado el típico de los problemas fitosanitarios. Madden, et al., 2007, clasifica a los análisis espaciales de enfermedades en dos grupos: los que provienen de datos dispersos y con pocas muestras que no reportan su ubicación en el espacio, y los intensivamente mapeados o con identificación de su posición en el espacio a través de algún sistema de coordenadas cartesianas. Para el primer grupo se encuentran muchas metodologías estadísticas, en términos generales se tienen: χ^2 para distribuciones binomiales, betabinomiales, poisson, binomial negativa, índices de dispersión, pruebas de series geométricas, etc. (Hughes et al., 1997, Madden, et al., 2007); y para el segundo grupo se tienen en general tres tipos de análisis, autocorrelación espacial, geoestadística y Análisis Espacial por Índices de Distancia (SADIE), (Madden, et al., 2007), en el caso de la técnica SADIE esta ha sido utilizada inicialmente en estudios de poblaciones de insectos y aplicadas en fitopatología a variables de conteos o de porcentajes de severidad (Perry, 1998), sin embargo, su utilidad se limita a la descripción de los patrones sin capacidad predictiva ni de modelado. Otros autores mencionan además otras técnicas que son utilizadas en general para cualquier tipo de variable espacial y que hacen uso de mapas, como las de Análisis Exploratorio de Datos Espaciales EDA, media y mediana, (Cressie, 1993), media móvil, polígonos thiessen, triangulación o interpoladores del inverso de la distancia (Fleisher et al., 1999).

No obstante, es con la llegada de la geoestadística al análisis espacial de epidemias que se logra reunir las ventajas de varias metodología, permite además de detectar patrones de agregación, estimar el grado de covarianza entre unidades distanciadas h

unidades bajo el concepto de continuidad espacial (variogramas, correlogramas, o covariogramas), y el de predicción, kriging, con mediciones de la incertidumbre de la misma (Fleisher et al., 1999; Cressie, 1993). Aunque se presentan algunas críticas en su uso pues una enfermedad, en rigor, no es una variable con continuidad espacial, los resultados que entrega el análisis geoestadístico son coherentes y de alta capacidad explicativa en relación a los patrones de la enfermedad y su relación con el ambiente que la contiene.

3.2.6 Geoestadística

En un principio, el uso de la geoestadística estaba restringido a la minería, más tarde, las ciencias biológicas encontraron en esta metodología una herramienta aplicable a diferentes escalas (Hughes et al., 1997), desde una sola planta, o parte de ella (Dandurand et al., 1995), hasta regiones geográficas completas (Nelson et al., 1994). Además, puede ser utilizada en todo tipo de variable continua, y sus supuestos son menos rígidos que los de las técnicas de autocorrelación (Larkin et al., 1995).

▪ Semivarianza

Las bases conceptuales de la geoestadística se encuentran en el concepto de variable regionalizada, definida como la variable cuyo valor depende de su posición en el espacio, y del semivariograma o relación funcional de la variación de dicha variable con la distancia (Cressie, 1993). En otro sentido, el semivarianza, $G(h)$, se define como el promedio de las diferencias al cuadrado de los valores de una variable separadas h unidades de distancia:

$$G(h) = \frac{\sum [F(x_i + h) - F(x_i)]^2}{2N_h} \quad (3-8)$$

donde x_i es la posición de una muestra del par, $x_i + h$ es la posición de otra muestra h unidades distante, $F(x_i)$ es el valor de la variable en la posición x_i , y N_h es el número de pares $(x_i, x_i + h)$. En los casos típicos de semivariogramas, cuando la distancia h es grande, los valores de la variable se independizan y por lo tanto el valor de $G(h)$, llega a un máximo denominado 'Sill' en una distancia 'Rango'. Es decir, que en el valor de Sill la correlación entre puntos distanciados h unidades, es estadísticamente cero (Hughes et al., 1997).

La semivarianza se puede caracterizar por un número limitado de funciones, las cuales tienen que cumplir la propiedad de ser definidas positivas (Cressie, 1993), algunas de ellas son: Exponencial, esférica, cuadrática racional, gaussiana, onda, lineal y de potencia (Gumpertz et al., 1997). Aunque las más comunes son las lineales y las esféricas (Hughes, 1997).

Al momento de seleccionar el modelo que más se ajuste al semivariograma experimental, la teoría estadística ha presentado diferentes metodologías, entre las que se cuentan: mínimos cuadrados, máxima verosimilitud, o el método robusto propuesto por Cressie (Cressie, 1993; Little et al., 2006; SAS, 2007), sin embargo, estas metodologías necesitan de gran cantidad de información; algunas reglas empíricas proponen que deben tenerse al menos 30 datos para la estimación de cada punto del semivariograma (SAS, 2007). Cuando la información no es suficiente, se ha encontrado que es satisfactorio realizar ajustes visuales de los datos a un conjunto de semivariogramas modelo, y aún cuando se posea buena cantidad de información ajustes visuales previos a la estimación de parámetros han mostrado gran utilidad (SAS, 2007). Aunque si el objetivo es realizar predicciones en sitios no muestreados con kriging, estas predicciones son robustas a la selección del modelo, y por lo tanto no es crítico conocer con exactitud los parámetros del variogramas (SAS, 2007).

Para la selección del modelo también es necesario considerar la existencia de valores de $G(h)$ diferentes a cero cuando la distancia h es igual a cero (efecto *Nugget* o Intercepto), lo cual, a luz de la matemática del modelo es imposible, pues en la distancia $h=0 \rightarrow G(h)=0$; lo que implica variaciones en una escala menor a la medida en cualquiera de las distancias evaluadas, y por lo tanto la mínima distancia considerada ya indica cierto grado de independencia, el caso extremo se puede presentar con modelos de intercepto puro, en donde a ninguna distancia evaluada se detecta relación espacial de las mediciones; otra explicación a este efecto es que sea sólo un caso de error sistemático natural en la toma de los datos (Cressie, 1993).

Por último, es necesario mencionar otro de los aportes importantes tanto de la geoestadística como de las técnicas de autocorrelación al conocimiento de las epidemias, la anisotropía, que es la forma en la que las relaciones espaciales detectan diferencias en el comportamiento de la enfermedad en diferentes direcciones, lo cual permite plantear hipótesis que relacionen factores ambientales espaciales con los patrones y los gradientes de dispersión.

▪ Kriging

El segundo elemento que compone lo que se conoce como geoestadística es el kriging, o metodología de predicción, que partiendo del semivariograma, permite predecir el comportamiento de la variable en lugares no muestreados (Cressie, 1993; Fleisher et al., 1999).

$$Z^*(\gamma_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z(\gamma_i) \quad , \quad \text{con} \quad \sum_{i=1}^n \lambda_i = 1 \quad (3-9)$$

En donde cada predicción en un punto no muestreado $Z^*(\gamma_0)$ es la mejor combinación lineal insesgada de los datos muestreados, estimador BLUP, (Cressie, 1993; SAS, 2007) por medio de la ponderación λ_i .

La estimación puede considerar todos los puntos muestreados o subconjuntos de ellos, Kriging Global (KG) y Kriging Local (KL), respectivamente. Para definir si se realiza KG o KL, se utiliza el concepto de rango de correlación (ε), el cual se define como la distancia a la cual la covarianza es 5% de su valor en cero (caso típico de los variogramas gaussianos, para los demás, el concepto cambia ligeramente).

$$C_z(\gamma_\varepsilon) = 0,05C_z(0) \quad (3-10)$$

Cuando el rango de correlación es igual a la longitud del espacio muestreado se recomienda el uso del KG, pero si es menor, se recomienda KL (SAS, 2007). También se realiza KL cuando el variogramas estimado procede de residuos de modelos que eliminaban tendencias generales del proceso espacial, por lo general, modelos polinomiales.

Por otro lado, como se mencionó, se ha demostrado que la estimación de kriging es robusta con respecto a la estimación de la relación funcional del variogramas y de sus parámetros, mas no es tan robusta la estimación de los errores estándar, por lo que se recomienda como chequeo del modelo ajustado, evaluar los errores estándar de diferentes modelos alternativos al mismo variogramas, a fin de seleccionar el que produce las estimaciones más bajas de los errores estándar (SAS, 2007).

En el caso que se detecte anisotropía, el variogramas que se ingrese para la predicción debe ajustarse dependiendo del tipo de gradiente que se presente (ejes máximo y mínimo). Si los cambios

corresponden con variaciones solo en el rango (a_0) se denomina anisotropía geométrica; pero si los cambios se dan tanto por la forma de la estructura de covarianza o por la magnitud de C_0 , o por ambos, se denomina anisotropía zonal (SAS, 2007).

En términos generales, los estudios geoestadísticos se han hecho más frecuentes en epidemiología vegetal desde la aparición del trabajo de Chellemi et al., 1988. Se destacan los trabajos realizados por Dandurand et al., 1995, donde se mostró la utilidad de la geoestadística en cualquier escala, para este caso el patrón espacial de un patógeno en raíces; por Lecoustre et al., 1989, quienes mostraron la utilidad de la metodología de kriging con diferentes intensidades de muestreo de la enfermedad evaluada; por Larkin et al., 1995, relacionando factores espaciales con la dispersión de una enfermedad; por Jaime-García et al., 1996, quienes encontraron estructuras espaciales a características genéticas de patógenos que tienen la posibilidad de migrar y recombinarse; por Nelson et al., 1994, en la predicción de paisajes que pueden favorecer o suprimir el desarrollo de una epidemia; o por Magan et al., 2011, evaluando el impacto del cambio climático en poblaciones de hongos, entre muchos otros.

Sólo queda por decir que, como cualquier otra metodología estadística la geoestadística sólo confirma, refina y cuantifica el análisis (Lecoustre et al., 1989), y que como cualquier otra metodología estadística, no siempre es necesaria, en algunos casos un simple mapa puede dar toda la información que se necesita (Nelson, 1999).

3.3 Materiales y Métodos

3.3.1 Datos utilizados

Se trabajaron seis bases de datos: la primera relacionada con la información geográfica, agroecológica y de la enfermedad en las

573 plantaciones participantes; información climática en cuanto a la direccionalidad del viento entre los meses de enero de 2008 y septiembre de 2010, tomados de la estación automática en tiempo real del IDEAM (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales), ubicada a 35 km al sur occidente de la desembocadura del río Sogamoso en el río Magdalena, en predios del Campo Experimental Palmar de la Vizcaína, el cual se consideró una muestra representativa de esta variable para la zona; las restantes cuatro bases de datos se relacionan con los niveles nutricionales de palmas sanas de aproximadamente 170 lotes evaluados entre los años 2001 a 2009, se destaca que esta información abarca sitios de alta y baja incidencia de la enfermedad dentro y entre zonas foco.

La depuración de las bases de datos de la epidemia se dio bajo diferentes criterios:

- Plantaciones que por diversas razones no fue posible de ubicar espacialmente fueron descartadas del estudio
- Aquellas plantaciones que no reportaron datos de enfermedad fueron descartadas.
- Lotes que redujeran la incidencia entre una y otra lectura fueron descartados. Pues reducción de valores de incidencia de la enfermedad se consideran error de muestreo.
- Aquellas epidemias que variaban muy poco respecto a su media generaban pérdida de exactitud en los cálculos (SAS, 2007), por lo que al identificarlas, fueron eliminadas del análisis.
- Epidemias cuyos residuales estudentizados fueran atípicos o cuyos valores palanca tuvieran alta influencia en modelos de relación entre epidemia y cargas factoriales y que además desde la perspectiva técnica no pudieran ser explicados

- Epidemias con menos de dos reportes en el tiempo, fueron descartados del análisis.

En total se seleccionaron 697 lotes, los cuales se consideraron como epidemias independientes. El 76% (532 lotes) fue seleccionado para la estimación de los parámetros del modelo y el restante 24% (165 lotes) como datos para validación.

Para su manipulación en los análisis las plantaciones fueron codificadas desde el número 10001 y los lotes dentro de cada plantación, comenzando para cada una de ellas, desde el número 5001.

Los análisis nutricionales se concentraron en dos fases, la primera entre los periodos de 2001 a 2003, el cual se denominó periodo predisponente y de 2004 a 2006 periodo infeccioso. Aunque se disponía de datos en periodos anteriores y posteriores a estos, no se consideró estos datos tuvieran una relación biológica con la enfermedad ya sea porque o los datos son muy antiguos o porque la respuesta que se obtenga puede ser un efecto y no una causa de la enfermedad.

Los datos de la enfermedad fueron analizados semestralmente pues en esta frecuencia de seguimiento se pudieron clasificar a todas las plantaciones que reportaron datos de la enfermedad, es claro que hubo plantaciones con intensidades mayores a un semestre y plantaciones con intensidades de seguimiento inferiores a un semestre.

Los datos de enfermedad se comenzaron a reportar desde el segundo semestre de 2006 hasta el segundo semestre de 2009, en total se analizaron siete lecturas.

3.3.2 Estimación tasas de desarrollo de la enfermedad

Para la estimación de las tasas de desarrollo de la enfermedad se utilizaron solo aquellos lotes que al menos tenían reportado cuatro lecturas. En total se obtuvieron 320 lotes con esta característica.

Para corregir problemas propios del cálculo de tasas con los modelos presentados en donde algunas de las funciones de estos modelos no están definidas en los valores 0% y 100%. Se sumó a la incidencia de todas los lotes una palma enferma y en los casos donde se reportaba el 100% de incidencia los valores fueron reducidos a 99.99%.

La evolución en el tiempo se enfocó en tres posibles hipótesis: 1) la propuesta por Bergamin, et al., 1998, de tasas lineales; 2) la que se infiere de Martínez, 2010, quien menciona que el avance de la PC está asociado con las precipitaciones y por lo tanto la tasa de desarrollo de la enfermedad sería variable; y 3) la clásica de una enfermedad policíclica infecciosa bajo los modelos monomolecular, gompertz y logístico. Para la primera se evaluó el modelo de una línea recta, para la segunda se evaluó un modelo polinomial de orden tres y para la tercera por análisis de regresión lineal simple sobre los valores de incidencia transformados para los modelos monomolecular, gompertz y logístico (Campbell y Madden, 1990; Neher, et al., 1997).

A diferencia de la recomendación de inspección de residuales visualmente propuestas por Campbell y Madden, 1990 y por Neher, et al., 1997, se optó por estimar la estadística de Durbin-Watson y graficar su distribución mediante histogramas de frecuencia con el fin de identificar cual de los modelos genera menos sesgos respecto al valor crítico 2 (Durbin y Watson, 1951; SAS, 2007).

Dentro de los criterios para selección del modelo se debe trabajar con las estimaciones que dan los modelos y contrastarlas contra los datos observados. En este caso también se propone cambiar el criterio de uso de las estadísticas de R^2 y CME propuestas por Campbell y Madden, 1990, y utilizar la estadística CCC el cual ha sido creado explícitamente para hacer este tipo de comparaciones (Lin, 1989; Lin et al., 2002).

El modelo seleccionado fue estimado por MCO en todos los lotes que tuvieran al menos dos lecturas en el tiempo. En total con esta característica se consiguieron 1232 lotes. De esta forma se pudo generar una predicción de la incidencia para cada uno de estos lotes en cualquiera de los tiempos evaluados.

Sin embargo, se consideró adicionalmente la predicción de la incidencia al mes 30 como valor puntual de seguimiento de la enfermedad. De esta forma se tuvieron dos variables de la enfermedad, la tasa de desarrollo y la incidencia al mes 30. Estas dos variables fueron reducidas a una sola mediante el cálculo del componente principal asociado a ellas.

Dada la necesidad de interpretar bajo un modelo biológico las variables de nutrición foliar y las de producción, se procedió a estimar los valores medios, máximos, mínimos y los rangos intercuartiles, para los dos periodos considerados, predisponente e infeccioso. Además, teniendo en cuenta que los registros estaban desbalanceados pues no todas las plantaciones tenían la misma cantidad de muestras de lotes ni en los mismos periodos de tiempo, fue necesario realizar diferentes combinaciones de los tres grupos de variables, agroecológicas, nutricionales y de producción, que permitieran aprovechar la mayor cantidad de datos en todas las combinaciones posibles, para la estimación de las cargas factoriales entre las variables de enfermedad (componente principal) y las variables ambientales.

La metodología inicial para identificar la estructura de los datos de enfermedad fue AEF. Para este análisis se utilizó las correlaciones múltiples al cuadrado como estimadoras iniciales de comunalidad. El método de factores principales fue utilizado para extraer los factores. Paso seguido se utilizó la rotación de factores promax (oblicua). Para la selección de los factores a extraer se consideró que los valores propios no podían ser inferiores a la unidad, que el aporte de cada componente no podía ser inferior al 5% y que en conjunto los componentes seleccionados deberían contener al menos el 70% de la varianza total. Además se tuvo en cuenta que alguno de los factores estuviera correlacionado con el componente asociado a la enfermedad.

Para la interpretación del patrón del factor de rotación de la enfermedad, una variable se consideraba cargada sobre un factor determinado cuando su valor era mayor o igual a 0.4 y menor de 0.4 en el resto. El análisis se centro en los factores asociados a la enfermedad.

3.3.3 Análisis espacial

- **Tasas de desarrollo**

Se procedió de acuerdo con un análisis geoestadístico para el cual fue necesario obtener los residuales de un modelo polinomial de orden dos, pues la inspección visual del mapa de las tasas de desarrollo de la enfermedad mostraban tendencia en las direcciones sur-norte y oriente-occidente, Figura 3-5. Con esto se buscó cumplir con el supuesto de estacionariedad intrínseca (Cressie, 1993).

De acuerdo con la intensidad de las muestras se estimó un variogramas con vectores de salto con longitud de 1 km en trayectos de 6 km. Para evaluar anisotropía se estimaron los

variogramas muestra en 12 direcciones con ángulo de tolerancia de 22.5° y un ancho de banda de 0.3 km. Se estimaron los variogramas clásicos y con la versión robusta. Además se probó la hipótesis de dependencia espacial con las estadísticas de Moran y Geary (SAS, 2007).

Los variogramas muestrales isotrópicos y anisotrópicos fueron procesados mediante análisis de regresión no lineal con el fin de identificar el mejor modelo alternativo. Se compararon los modelos esférico y exponencial. La selección se hizo para los modelos con menor *nugget* y mayor varianza estructural (diferencia entre los valores de Sill y *nugget*).

Con los variogramas estimados se hizo la predicción espacial mediante kriging local, con radio de 4 km, con el fin de controlar la no estacionariedad de la media. Se hicieron predicciones tanto para la tasa de desarrollo de la enfermedad como para el intercepto.

Los valores de intercepto y de tasa predichos mediante el kriging fueron utilizados para generar curvas de progreso de la enfermedad en una rejilla de 25 km de ancho por 24 km de largo cada 0.5 km.

3.3.4 Variables meteorológicas y su asociación con la enfermedad

Como se verá posteriormente las curvas de progreso de la enfermedad no soportaron la hipótesis de tasas variables, lo que implica que la tasa de desarrollo de la epidemia fue constante en los tres años y medio que duró la evaluación, Figura 3-7. Esto unido al hecho que la cantidad de información sobre la enfermedad en el tiempo y la poca disponibilidad de variables meteorológicas en el espacio fue lo que condujo a descartar cualquier análisis de relación de variables meteorológicas, a excepción de la prevalencia de la dirección de los vientos, con la enfermedad.

Los datos de vientos fueron clasificados en dos grupos para la dirección y dos para el momento del día. Para la dirección se tuvo en cuenta la anisotropía de los modelos de tasas de desarrollo de la enfermedad a los 60° y 165° respecto al plano ecuatorial y para la duración del día se definió que las horas diurnas empezaban a las 6:00 a.m. hasta las 7:00 p.m., el periodo contrario se consideró periodo nocturno.

3.3.5 Modelo de pronóstico con datos nutricionales, agroecológicos y de producción

Para efectos de pronóstico se utilizaron los valores de tasa de desarrollo de la enfermedad. Las variables explicativas utilizadas fueron las cargas factoriales de las variables de nutrición, producción y agroecológicas, medidas como máximos, mínimos, medias y rangos en las dos épocas evaluadas. Las cargas fueron obtenidas con rotación varimax que asegura independencia entre los factores. El número de factores seleccionado fue el estimado del análisis de factores evaluado en la descripción inicial de la enfermedad medida como tasa e incidencia al mes 30. Se descartaron las epidemias cuyos valores de Medida de Kaiser de Adecuación de la Muestra general (MSA) fueran iguales o inferiores a 0.5.

Dichas cargas factoriales fueron incorporadas en un análisis de regresión lineal múltiple. Al cual se le evaluaron los valores de influencia mediante residuales estudentizados y leverage. Como se mencionó anteriormente las epidemias con valores influyentes identificados en este paso fueron eliminados desde el inicio del análisis.

Luego de la depuración de los datos se estimaron los parámetros de un modelo múltiple mediante selección por el procedimiento stepwise. También se estimaron los criterios de penalización bayesiano de Sawa y criterio de Akaike.

Con el fin de darle la oportunidad a todos los modelos de ser comparados bajo las mismas condiciones se depuró la base de datos de manera que todas las cargas factoriales estimadas tuvieran los mismos datos y se procedió de la misma forma que en el paso anterior.

Con el fin de evaluar el poder predictivo de los modelos se estimó el CCC entre el conjunto de datos de validación que correspondía a aproximadamente el 20% de las epidemias evaluadas y los valores predichos por el sistema de krigeado.

Para la interpretación final, solo se consideraron los modelos con valores de R^2 iguales o superiores a 110%.

3.4 Resultados y discusión

Como se mencionó en la metodología las plantaciones tenían diferentes intervalos de tiempo para el seguimiento de la enfermedad en la Figura 3-4 se observa, sin embargo, que los valores crudos de incidencia muestran un progreso sigmoideo típico de procesos epidemiológicos. La caída de la incidencia promedio en la lectura 36 obedece a una reducción en el número de datos y no a remisión de síntomas.

Con estos valores de incidencia se construyeron los mapas presentados en la Figura 3-5. Donde es fácil identificar una zona de alta incidencia de la enfermedad, la cual corresponde con la cercanía a la desembocadura del río Sogamoso en el Magdalena, Figura 3-6.

Figura 3-4: Incidencia en tiempo de la enfermedad pudrición del cogollo en palma de aceite en el Magdalena Medio colombiano. Tiempo cero corresponde al inicio de toma de datos del estudio epidemiológico de la enfermedad (Segundo semestre de 2006).

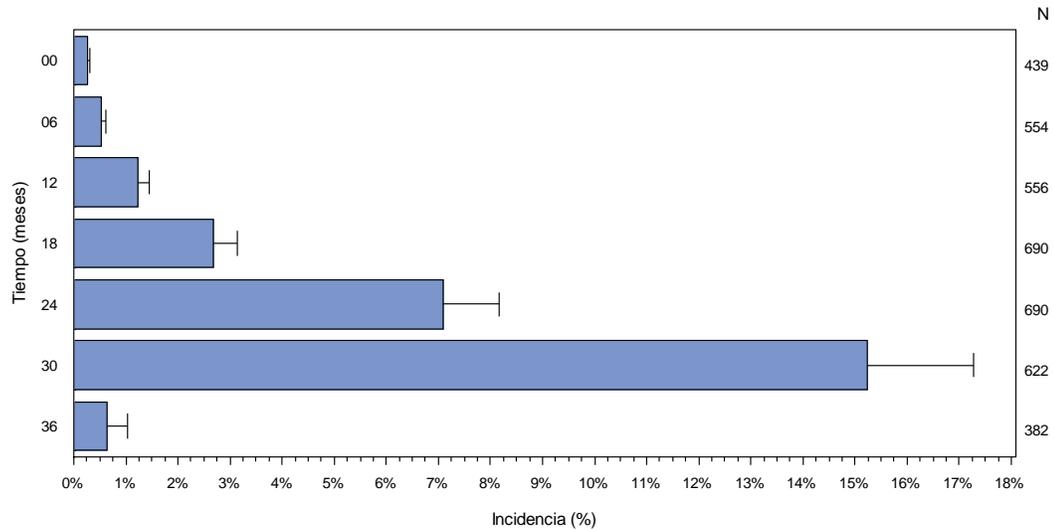


Figura 3-5: Incidencia de la enfermedad pudrición del cogollo de palma de aceite en el Magdalena Medio colombiano. Período comprendido de los datos: Segundo semestre de 2006 a segundo semestre de 2009. a) 0 meses; b) 6 meses; c) 12 meses; d) 18 meses; e) 24 meses; f) 30 meses.

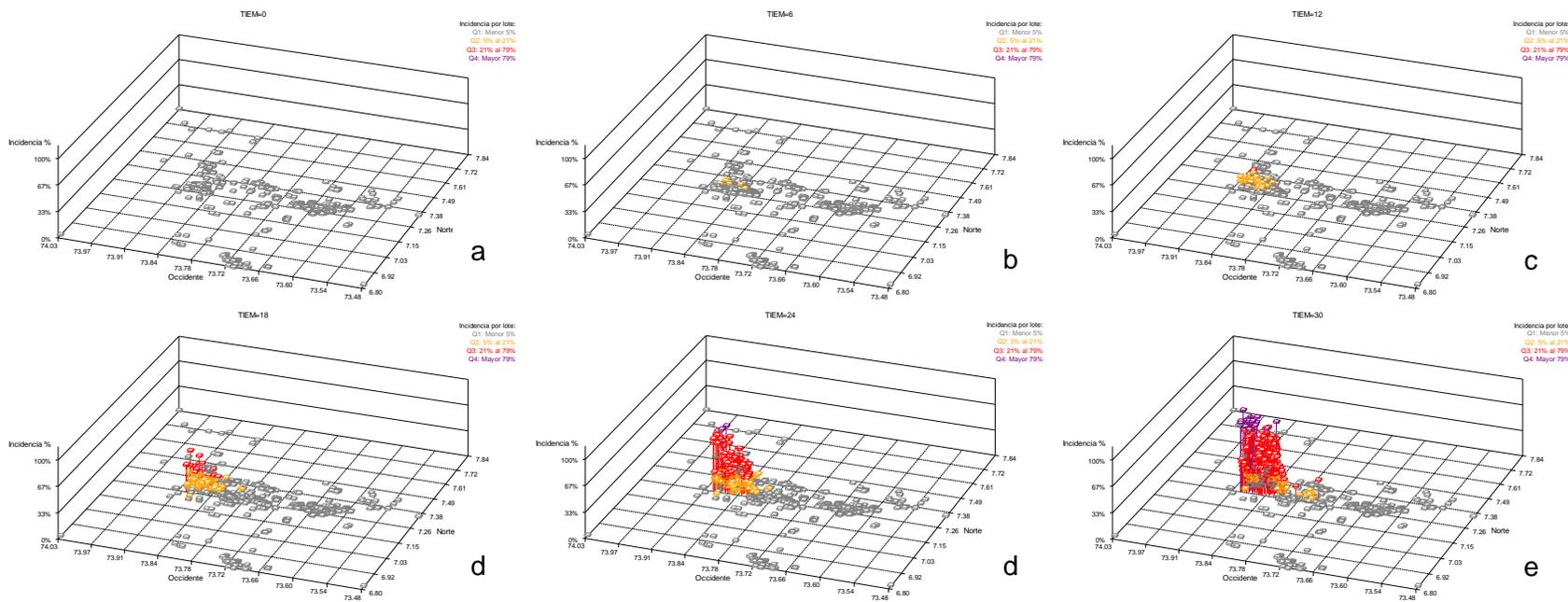
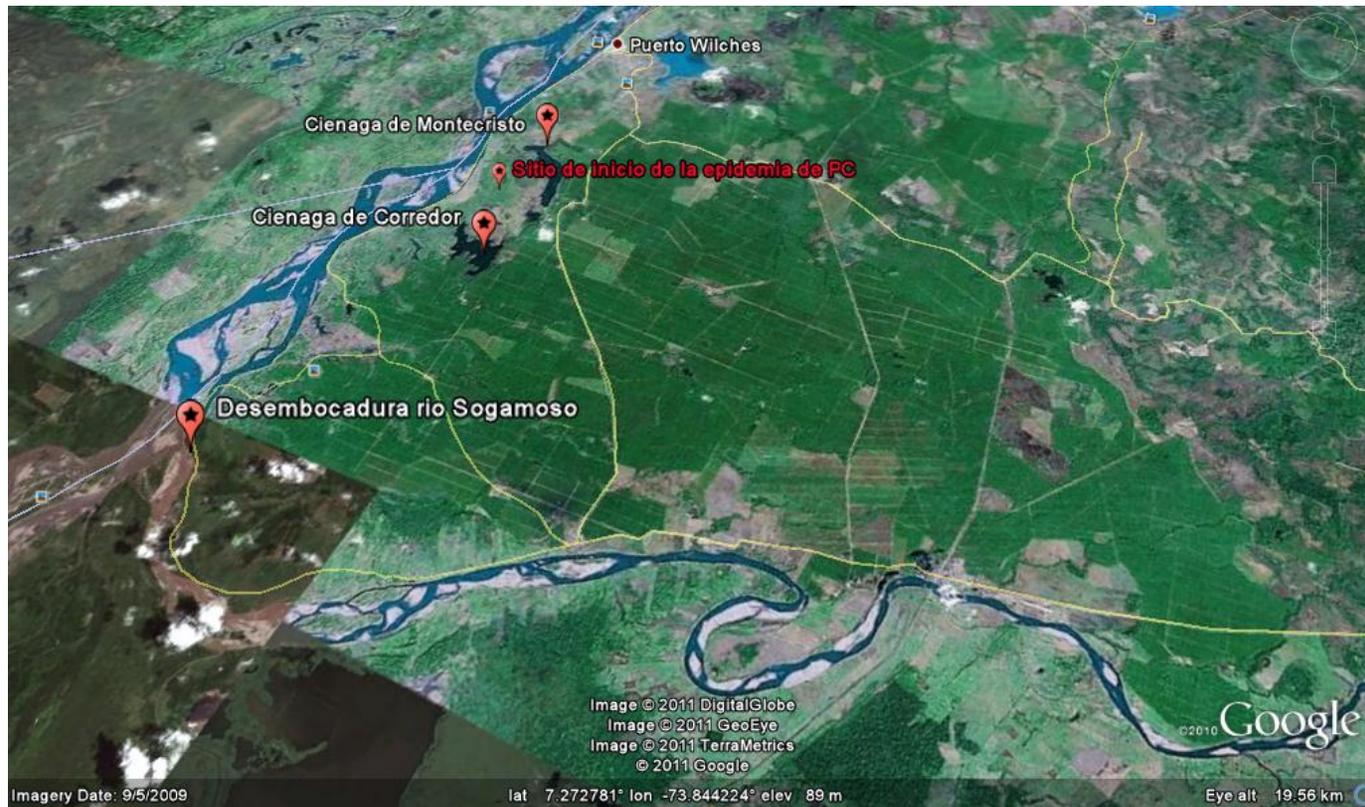


Figura 3-6: Fotografía aérea de la zona del estudio epidemiológico de la enfermedad pudrición del cogollo en palma de aceite en el Magdalena Medio colombiano. Se señala la desembocadura del río Sogamoso en el río Magdalena y las ciénagas de Corredor y Montecristo y el foco de la enfermedad, estimado a partir de los valores de intercepto de los modelos de progreso gompertz. Fuente: GogleEarth.

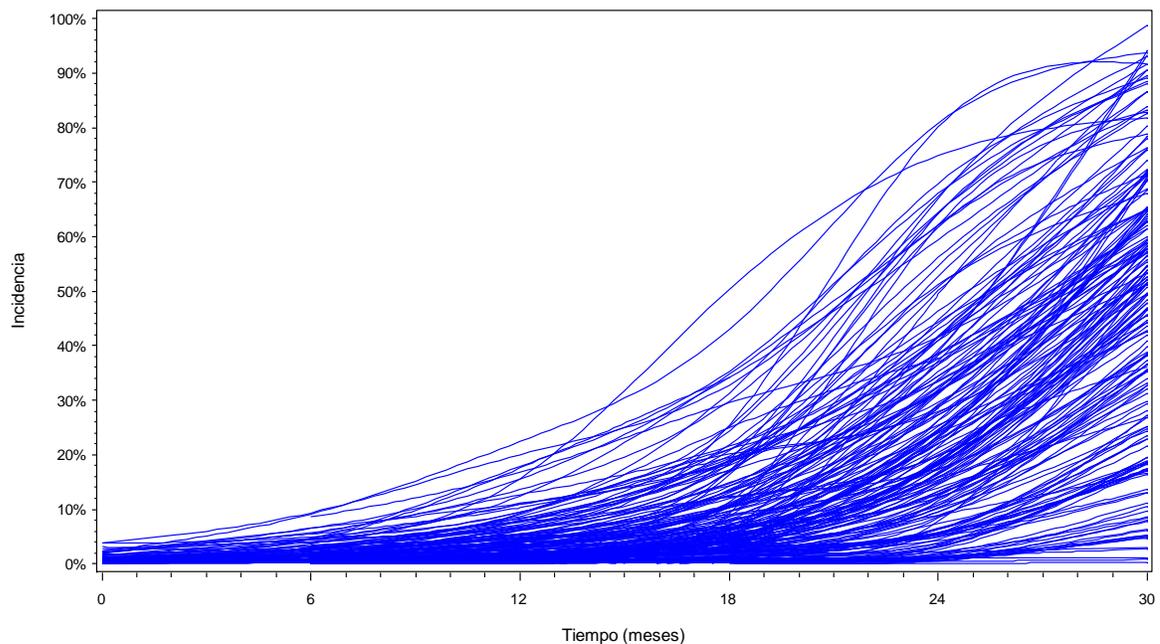


Con esta información se procedió a iniciar el ajuste de modelos temporales de desarrollo de las epidemias en los sitios evaluados. Para este análisis solo se escogieron aquellas epidemias que tenían al menos cuatro reportes en el tiempo, lo que permitió una mejor estimación de las tasas de desarrollo. Al hacer una inspección inicial de los datos de incidencia contra tiempo y aplicar un suavizado por Splines (SAS, 2007), se encontró que las curvas son altamente conservadas en su tendencia, lo cual es un criterio para definir que el mejor ajuste se da con los modelos clásicos de evolución de enfermedad propuestos por Vanderplank, Figura 3-7. Sin embargo, en lugar de evaluar la tendencia gráfica de los residuales, como lo propone Campbell y Madden, 1990, se estimó la estadística de Durbin-Watson para medir el grado de correlación entre ellos. Para mostrar de manera resumida las estadísticas estimadas se construyeron histogramas de frecuencia de las diferencias de estos valores respecto al punto crítico de independencia, que para esta estadística es dos, Figura 3-8(a). De esta gráfica se puede observar que los modelos gompertz y monomolecular acumulan al percentil 10 los valores más cercanos a dos, contrario al modelo polinomial de tasas variables que se descarta completamente del análisis con esta estadística. En cuanto al mejor ajuste por medio del CCC, Figura 3-8(b), en esta ocasión los modelos gompertz y logístico son, en conjunto, los que presentan los valores más concordantes entre las predicciones hechas por el modelo y los datos reales. Al analizar en que puntos son fuertes los modelos restantes, discriminando por los coeficientes de sesgo y de precisión, Figura 3-8(c y d), se encuentra que el logístico tiene mayor sesgo que el gompertz; en cuanto a precisión no se detectan grandes diferencias entre los dos modelos. Por lo tanto para los análisis posteriores se optó por trabajar con el modelo gompertz. Para el modelo gompertz se estimaron los intervalos de confianza del CCC, donde se observa que bajo este modelo el CCC nunca incluyó el valor cero, lo que

indica que la concordancia de este modelo con los datos reales siempre fue significativa, Figura 3-9.

Con el modelo gompertz definido se procedió a estimar los parámetros de la función en todas las epidemias que tuvieran al menos dos reportes en el tiempo. En la Figura 3-10, se muestran todas las curvas generadas agrupadas por cuartiles de las coordenadas norte, lo que implica que cuartil 1 corresponde al 25% de las epidemias en el extremo sur del área de estudio, el cuartil 2 corresponde al 50% de las epidemias hacia el centro del estudio y el cuartil 3, corresponde al 25% restante, ubicadas en la zona norte del estudio. Estas figuras muestran como las epidemias de mayor tasa de desarrollo se presentan en la zona norte del área de evaluación.

Figura 3-7: Valores reales de incidencia de la enfermedad pudrición del cogollo en palma de aceite en el Magdalena Medio colombiano. Datos observados desde el segundo semestre de 2006 al segundo semestre de 2009.



El único estudio donde se evalúa el comportamiento en el tiempo en Colombia es el de Hurtado et al., 2009, sin embargo, los modelos

utilizados no tienen explicación biológica y se orientaron más a labores predictivas a partir de modelos matemáticos sin mayor valor explicativo.

De esta forma se pudieron obtener estimaciones en todos los tiempos de evaluación para las epidemias que al menos hubieran reportado dos lecturas en el tiempo, Figura 3-11. Las gráficas de las tasas de desarrollo de la epidemia, Figura 3-12, muestran que los sitios con alta incidencia también tienen los valores más altos de las tasas de desarrollo de la enfermedad, Figura 3-12(b y c).

Con las tasas e interceptos estimados se inició la evaluación espacial de la enfermedad. Los variogramas fueron estimados en 12 direcciones diferentes mostrando, para las tasas, anisotropía zonal al cambiar el nivel de varianza estructural de modelos exponenciales entre las direcciones 165° con el valor más alto y 60° el valor más bajo, Figura 3-13(a); para el intercepto también se identificó anisotropía zonal, pero con modelos de potencia, de mayor varianza en el eje de los 0° a los 45° y con menor y en algunos casos estadísticamente cero en la dirección de los 75° a los 90° , Figura 3-13(b).

Los modelos escogidos para representar el proceso espacial fueron de tipo exponencial con parámetros de meseta=0.00122 y 0.3537; rango=0.7273 y 2.2523 e intercepto=0.000042 y 0.1579, para las tasas y el intercepto, respectivamente. Figura 3-13(d y e). Con esta función de covarianza se generaron las predicción kriging para una rejilla de 25 km de ancho por 24 km de largo cada 0.5 km, Figura 3-14. Un mapa tridimensional de las tasas se presenta en la Figura 3-15. De esta forma con los parámetros de covarianza espacial y con las tasas gompertz se estimaron las incidencias de la enfermedad en el tiempo y en el espacio, Figura 3-16.

Para la validación del modelo se estimaron las tasas de progreso de la enfermedad en el conjunto de datos reservados para validación, el cual representó cerca del 20% del total de las epidemias, Figura 3-17. El CCC estimado para esta validación fue $r_c = \text{IC95\%}[0.68 \leq 0.72 \leq 0.75]$, con una precisión $r = 0.76$ y un $C_b = 0.95$, lo que indica que el modelo tiene un alto nivel de exactitud pero falla en precisión.

Para el análisis de las variables agrometeorológicas, en primera instancia se observa una alta conservación de la tendencia temporal de las epidemias y buen ajuste de los modelos gompertz, que implican tasas constantes de desarrollo de las epidemias, y por lo tanto permiten inferir que las variaciones agroclimatológicas en los años de evaluación no tienen impacto sobre la velocidad de progreso de la enfermedad. No obstante, la dirección de los vientos y su distribución en el día sí podrían ayudar a explicar en parte la anisotropía de los modelos espaciales, los cuales muestran mayor grado de correlación en las direcciones horizontales que en las verticales. Para este caso se encontró que en la dirección donde se muestra una correlación espacial más alta hay una mayor proporción de vientos diurnos que en la de la correlación más baja, lo que puede implicar que las estructuras de los organismos involucrados pueden ser diseminados por los vientos en los momentos en los que se da el proceso de esporulación en horas del día. Figura 3-18.

Figura 3-8: Histogramas de diagnóstico de los modelos evaluados. a) desvíos del punto crítico dos de la estadística de Durbin-Watson; b) coeficiente de correlación de concordancia entre los valores predichos por los modelos y los valores reales; c) medida de sesgo utilizada en el CCC para selección del modelo más concordante; d) medida de precisión utilizada en el CCC para selección del modelo más concordante.

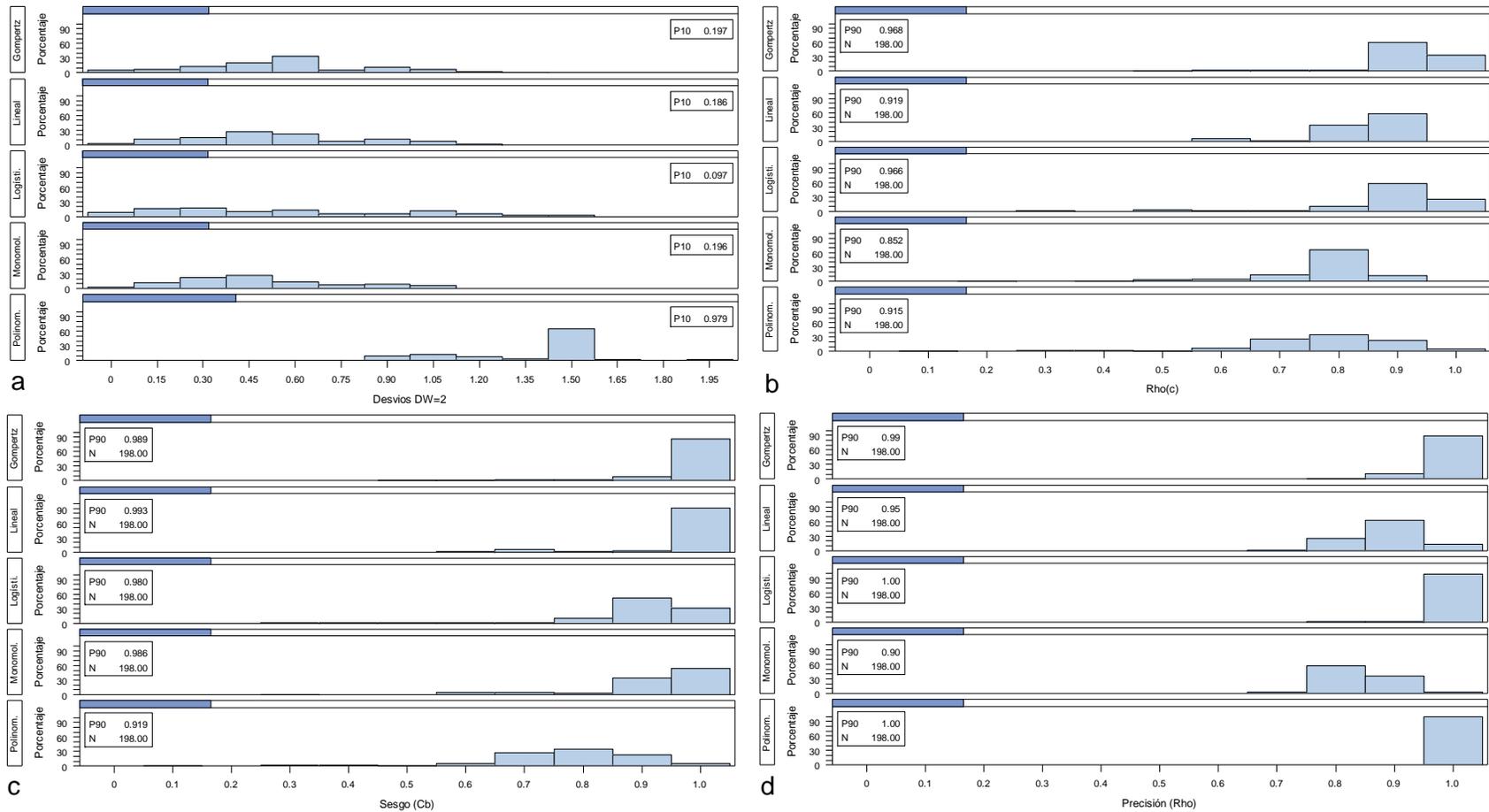


Figura 3-9: Intervalos de confianza al 95% para los coeficientes de correlación de concordancia entre los valores observados y los predichos a través del modelo gompertz, para las curvas de progreso de las epidemias en cada lote seleccionado (datos codificados). Puntos rojos corresponden con el valor medio del coeficiente de correlación de concordancia, líneas rojas y azules delimitan el intervalo de confianza para cada punto medio.

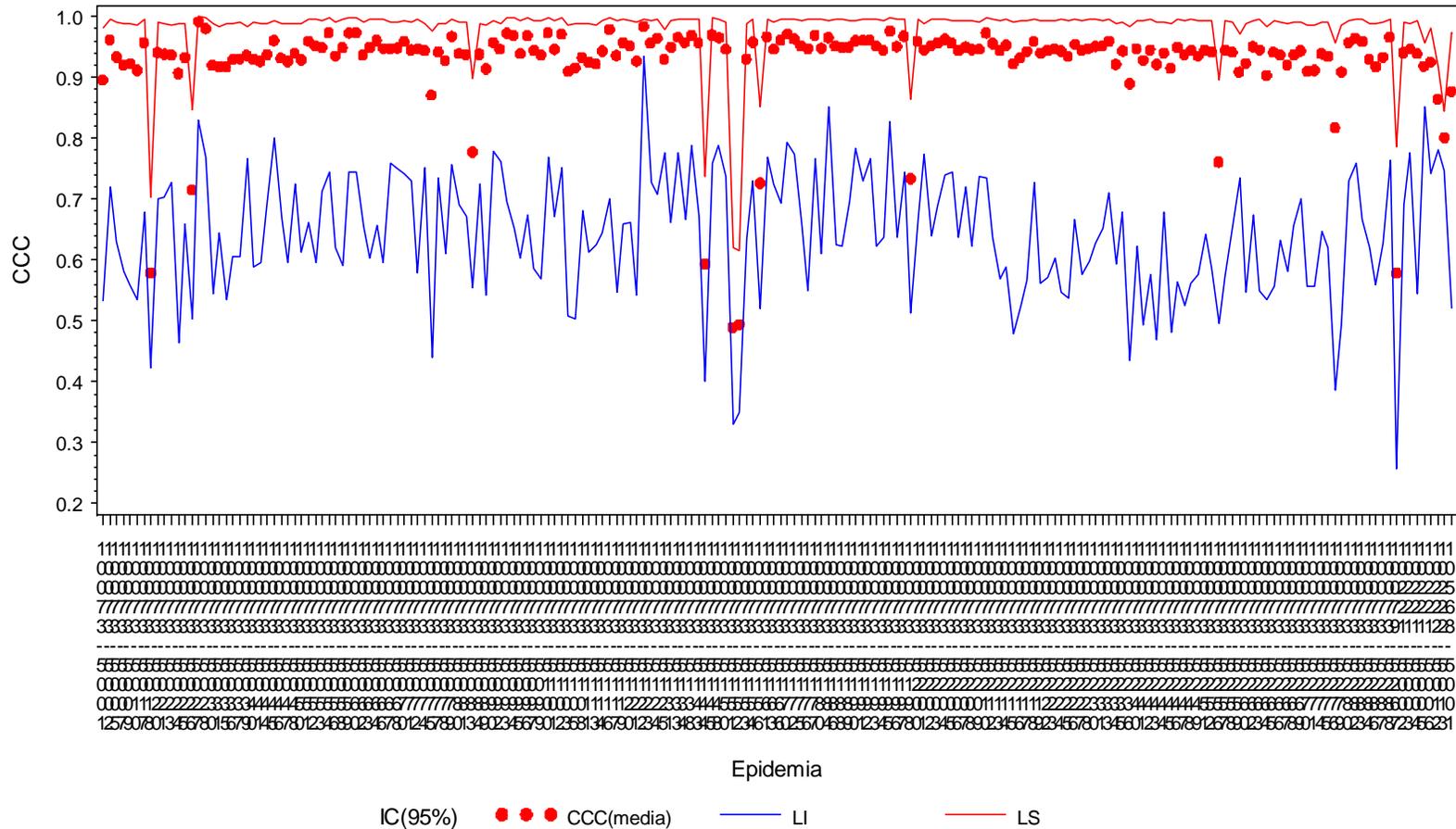


Figura 3-10: Curvas de progreso de la enfermedad de acuerdo con modelos gompertz para todos los lotes del estudio que al menos hubieran tenido dos lecturas en el tiempo. a) Cuartil 1 (25% de los lotes) correspondiente a las plantaciones ubicadas al sur del estudio; b) Cuartil 3 (50% de los lotes) correspondiente a las plantaciones ubicadas al centro del area de estudio; c) Cuartil 4 (25% de los lotes) correspondientes a las plantaciones ubicadas al norte de la zona de estudio.

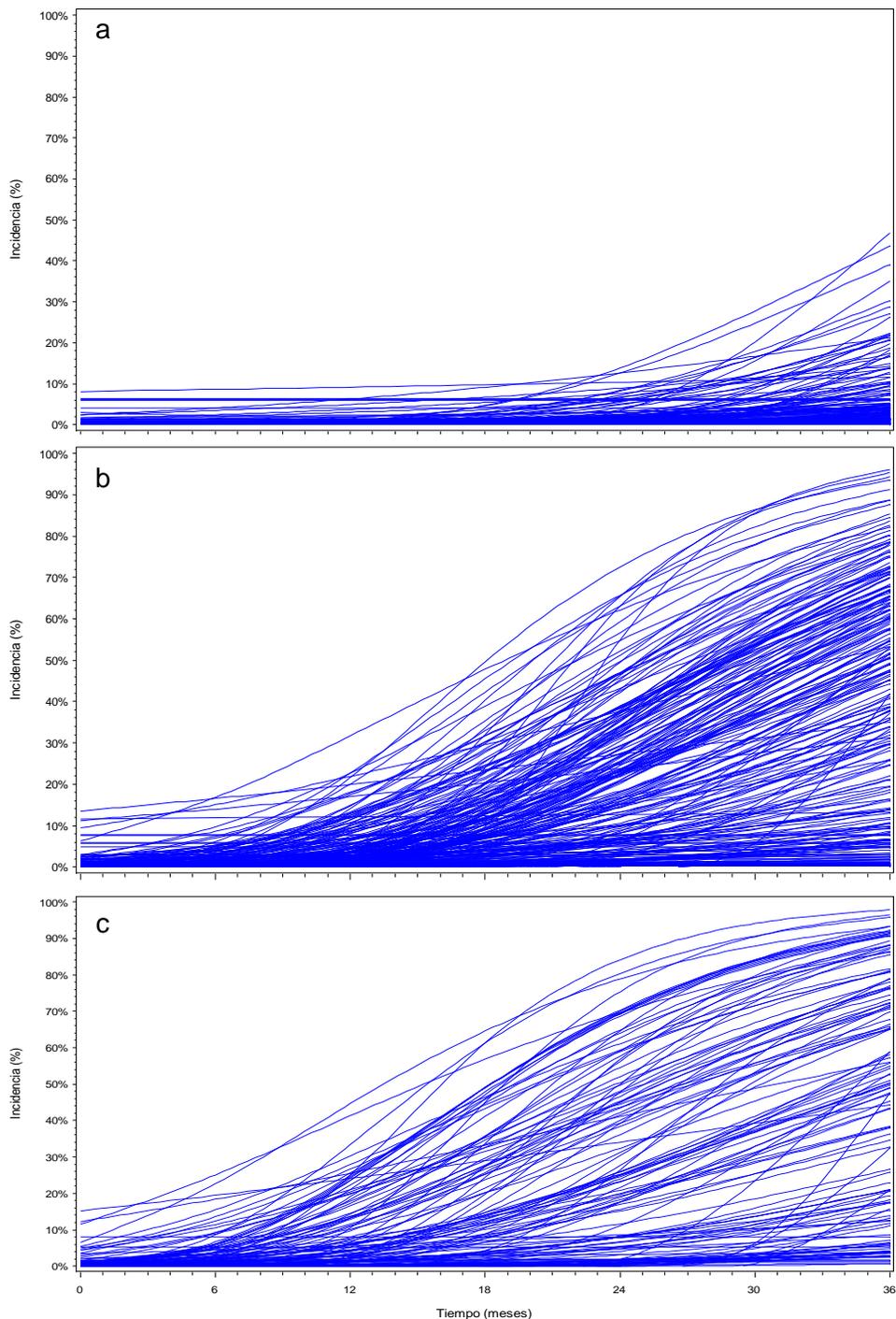


Figura 3-11: Pronósticos de epidemias de pudrición del cogollo de la palma de aceite, utilizando el modelo de Gompertz para lotes con al menos dos reportes de incidencia en el tiempo, entre el segundo semestre de 2006 y el segundo semestre de 2009. a) 6 meses; b) 12 meses; c) 18 meses; d) 24 meses; e) 30 meses; f) 36 meses.

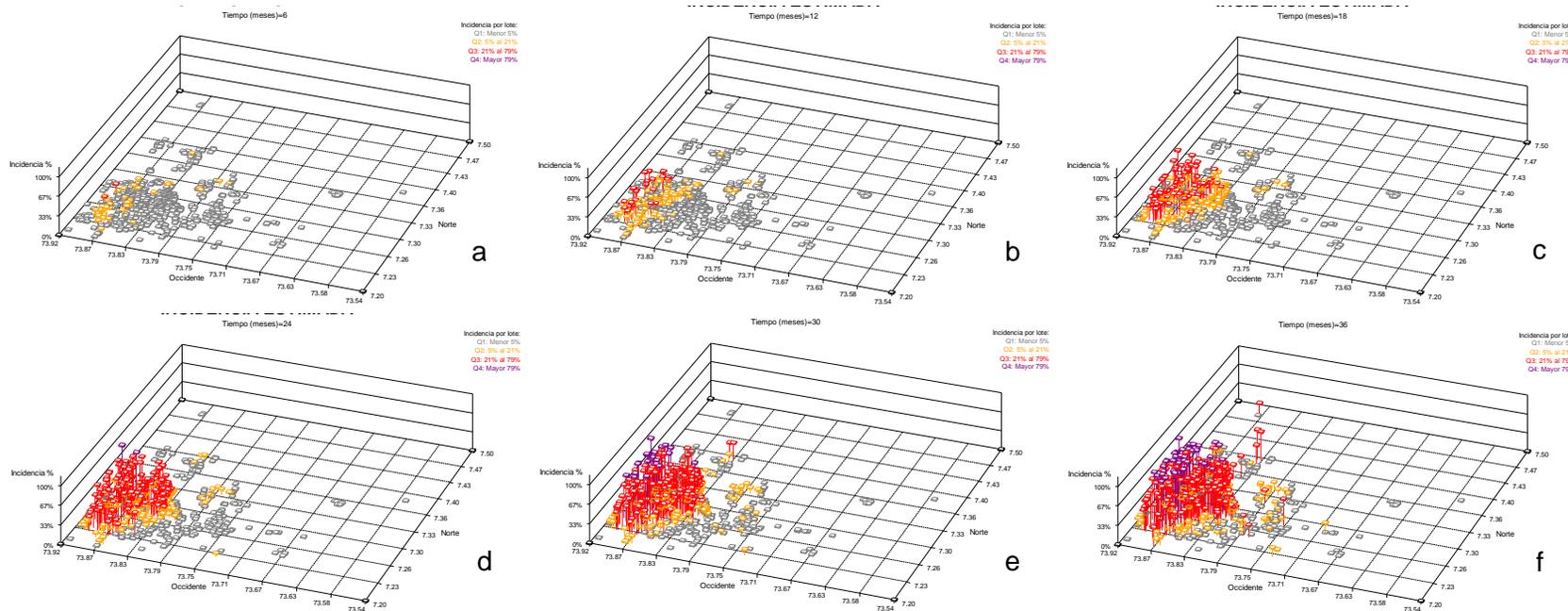


Figura 3-12: Tasas de desarrollo de pudrición del cogollo de la palma de aceite en la zona del Magdalena Medio Colombiano. a) Histograma de frecuencia; b) patrón espacial de las tasas de la enfermedad; c) incidencia máxima pronosticada al segundo semestre de 2009; y c) componente principal entre las variables tasa de desarrollo de la enfermedad y la incidencia máxima al segundo semestre de 2009.

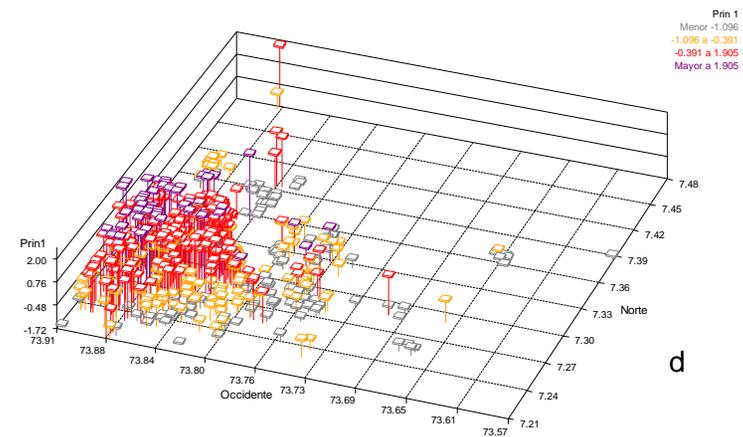
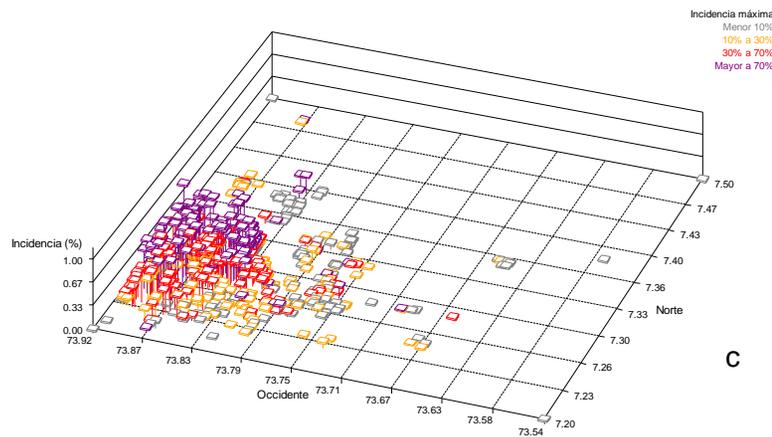
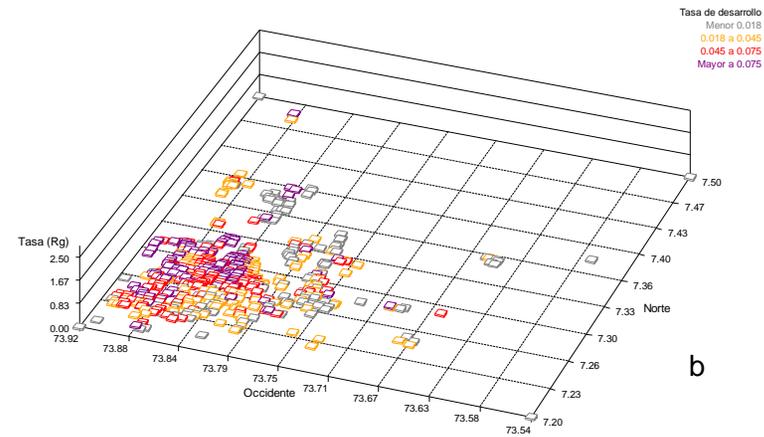
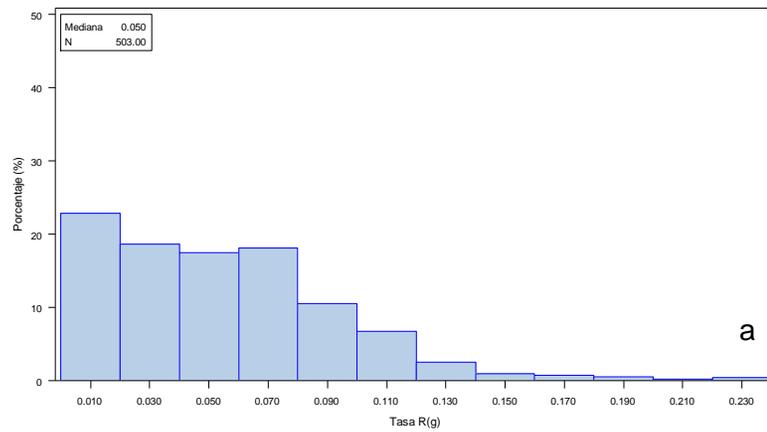


Figura 3-13: Variogramas isotrópicos y anisotrópicos de las tasas de desarrollo de un modelo gompertz para la enfermedad pudrición del cogollo en la zona del magdalena medio colombiano: a) semivariograma isotrópico exponencial; b) semivariogramas anisotrópicos exponenciales a 60° y 165°.

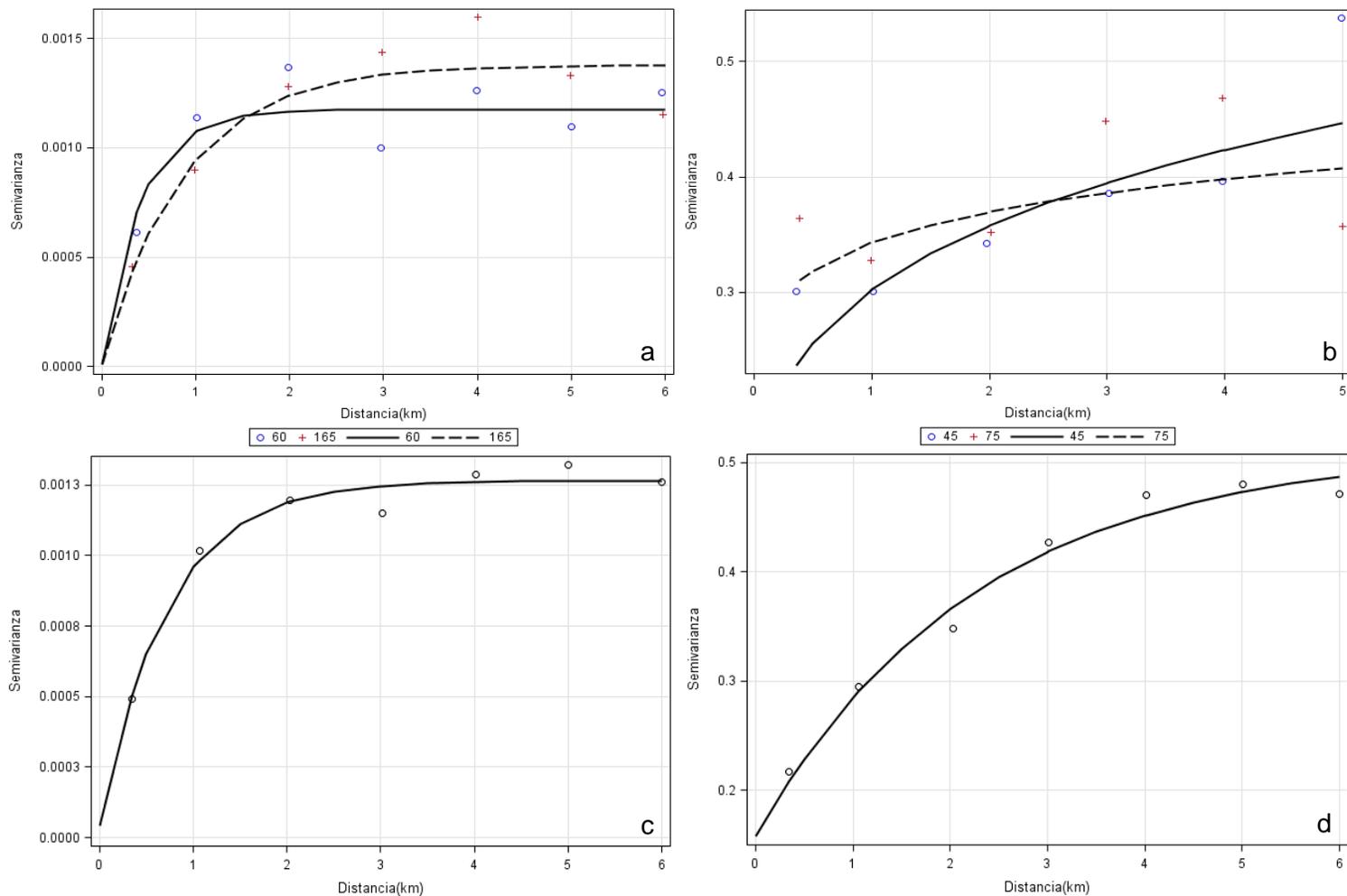


Figura 3-14: Estimaciones kriging para las tasas de desarrollo y el intercepto de los modelos gompertz para la enfermedad pudrición del cogollo en la zona del magdalena medio colombiano: a) estimación de la tasa; b) estimación del intercepto.

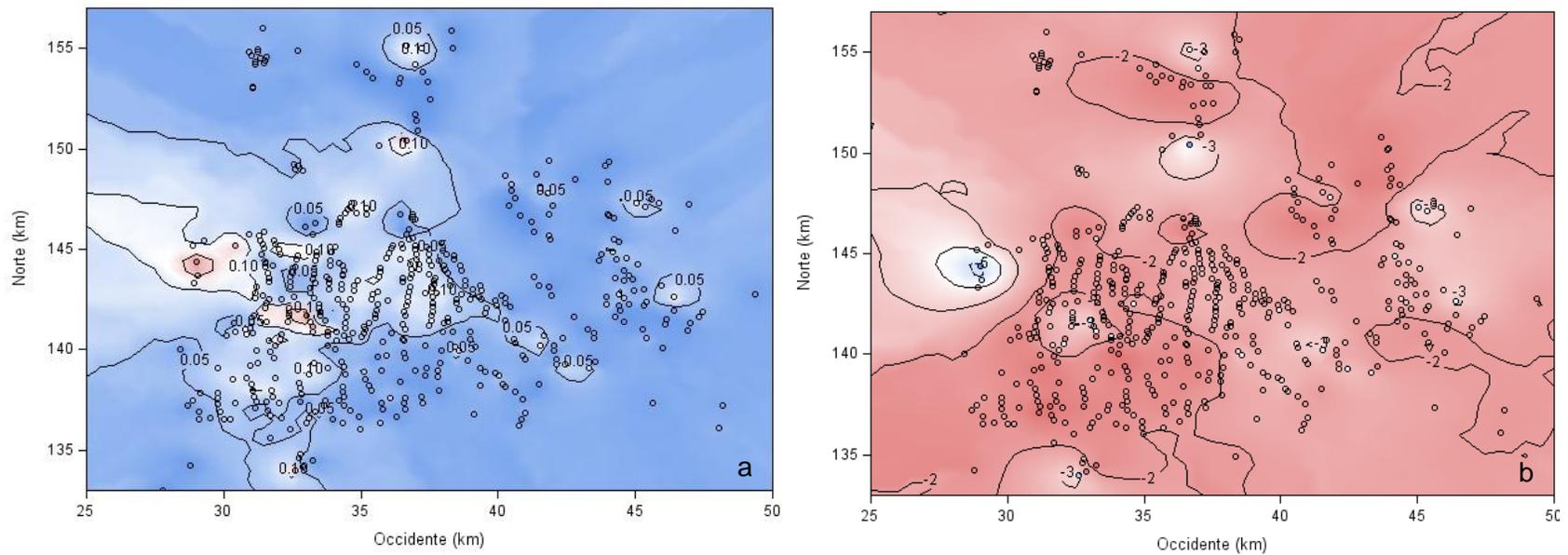


Figura 3-15: Predicciones kriging de las tasa de desarrollo de la epidemia.

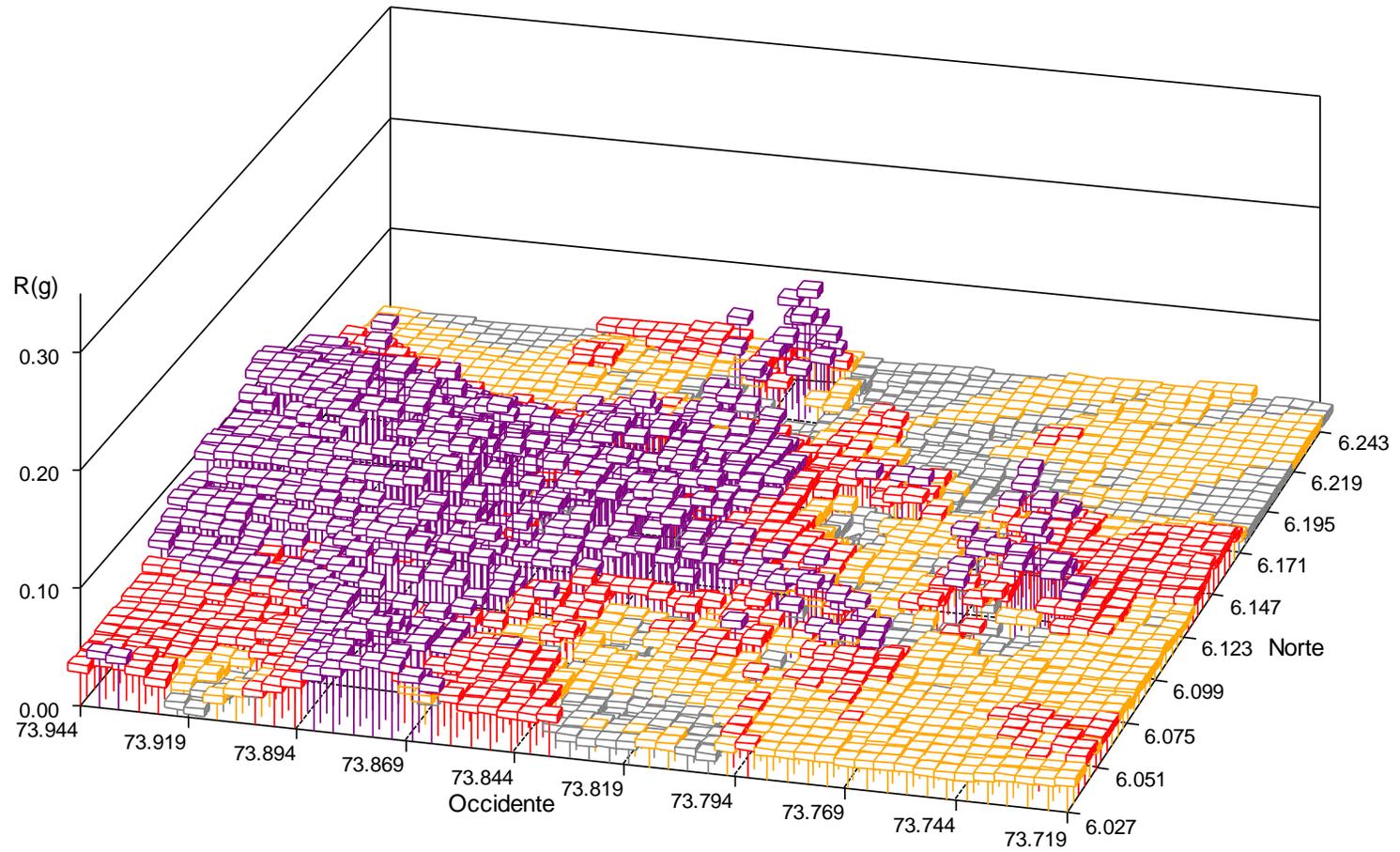


Figura 3-16: Predicciones espaciales y temporales de la epidemia a partir de un modelo temporal gompertz y uno espacial de tipo exponencial. a) 12 meses; b) 18 meses; c) 24 meses; d) 30 meses; e) 36 meses; f) 42 meses; g) 48 meses; h) 54 meses; i) 60 meses.

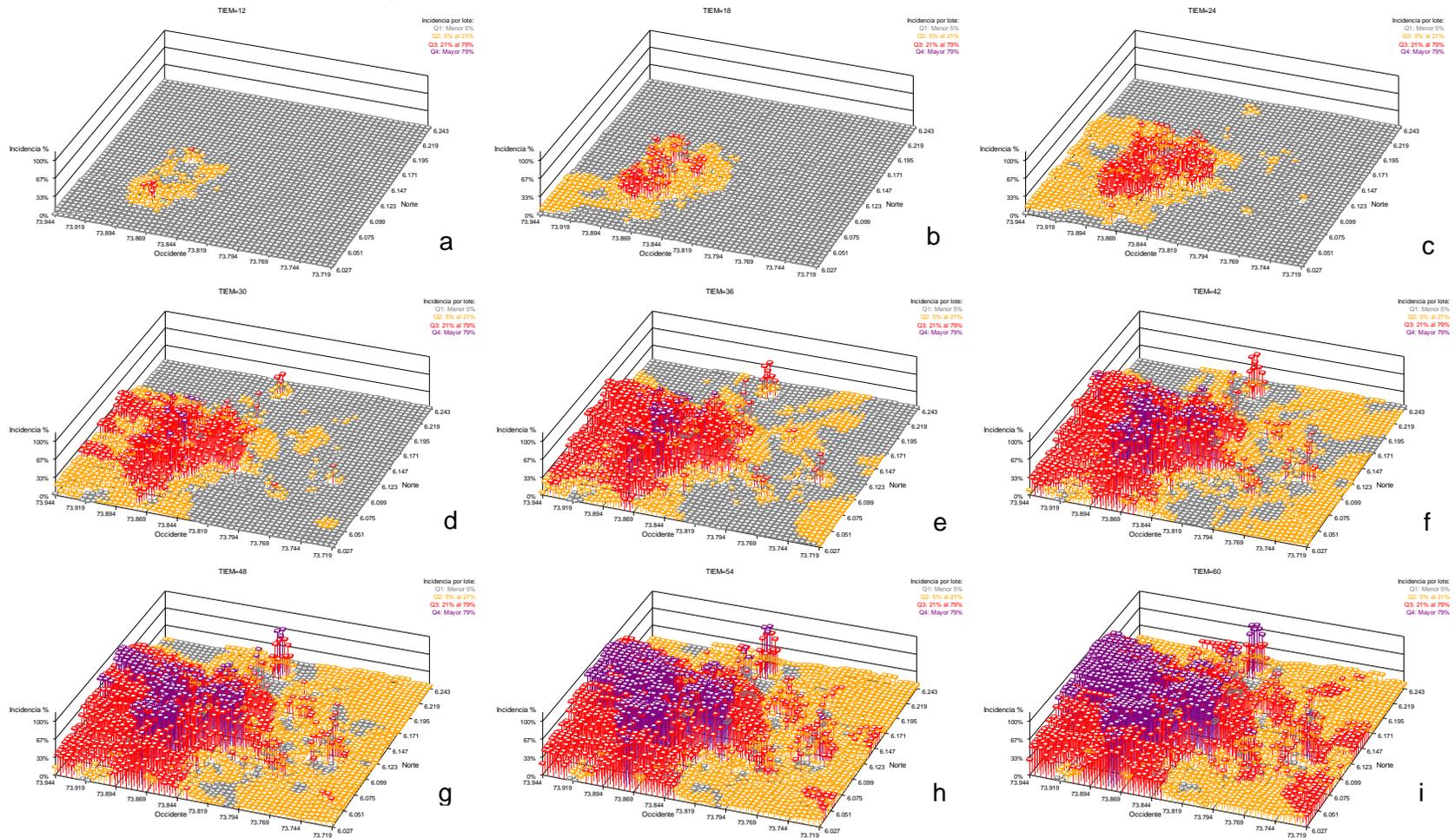


Figura 3-17: Relación entre los valores observados de tasa de desarrollo de epidemia en las epidemias reservadas para validación y las estimaciones kriging para dichos puntos. Línea sólida es una relación perfecta entre los valores predichos y los reales.

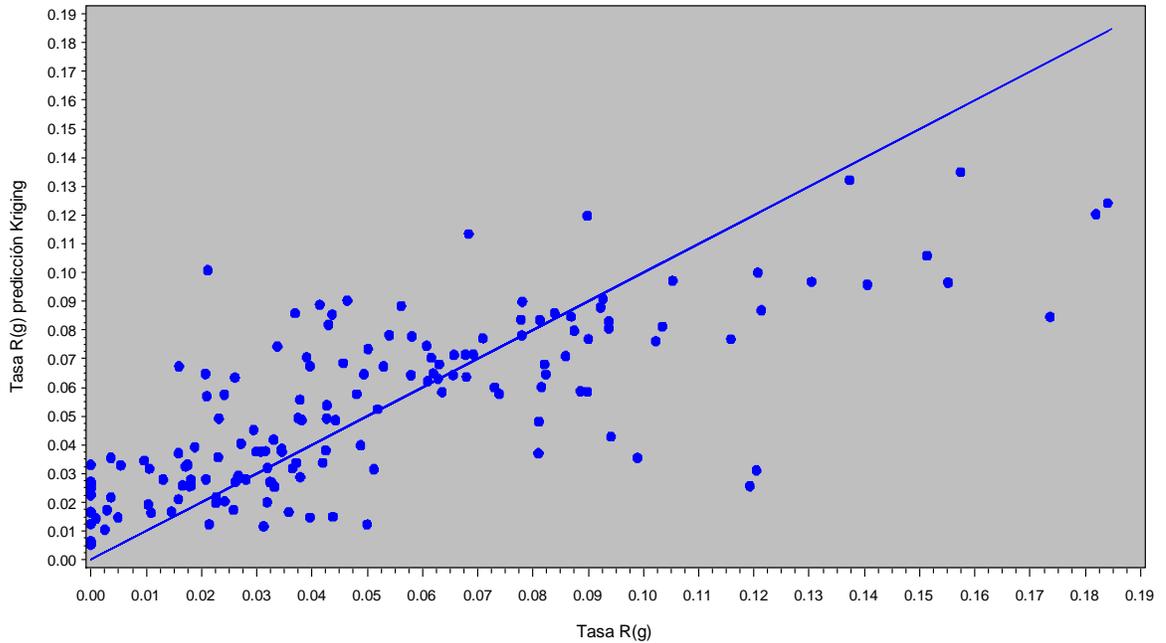
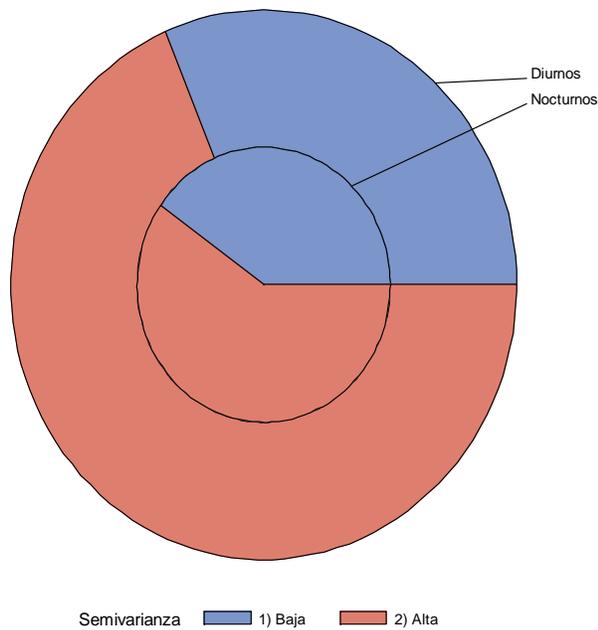


Figura 3-18: Relación de la frecuencia de vientos en dirección a las zonas de mayor y menor semivarianza de la epidemia, discriminado por hora del día.



Para la evaluación de la nutrición se optó inicialmente por comparar los niveles de los elementos, medidos como medianas de las distribuciones de frecuencia de los valores de la hoja 17, contra los estudios de Munevar *et al.*, 2001 pues estos a diferencia de los de Uexküll y Fairhurst 1991, si reportan niveles críticos de hierro y manganeso. De este análisis se puede ver que los macroelementos en el periodo de predisposición, a excepción de nitrógeno, se encontraban en deficiencia; para microelementos en este periodo solo los niveles de boro y de cobre se mantuvieron por debajo de los niveles recomendados; ya en el periodo de infección, algunas de las deficiencias de macroelementos fueron corregidas, como las de fósforo y calcio; potasio, magnesio y azufre siguieron por debajo de los niveles críticos; en cuanto a microelementos se destaca que a excepción del cobre el resto de los microelementos se encuentra en niveles por encima de los recomendados. Tabla 3-2, Figuras 3-19 a 3-30.

Por último, en la relación del estado nutricional de las palmas y el AEF, Tabla 3-3, se observó inicialmente que el modelo que mejor explicó la variable latente enfermedad fue el los rangos de valores nutricionales y de producción evaluados en la etapa infecciosa de la epidemia, Figura 3-31. De ese análisis se identificó que lotes que fueron estables en su contenido de potasio con valores medios y máximos altos fueron mas susceptibles al ataque de la enfermedad, de manera similar se comportó el magnesio y el nitrógeno.

El azufre, por el contrario, se relacionó positivamente con la enfermedad, pero posiblemente más por su fuerte relación con suelos arcillosos y mal drenados (Daroub y Snyder, 2007). En cuanto a microelementos el cinc y el cobre fueron los más relacionados con el proceso epidémico donde se observa de igual

forma que valores muy conservados (rangos intercuartiles bajos) de cobre y cinc en el periodo evaluado se relacionaron con mayores tasas de desarrollo de la enfermedad, si se tiene en cuenta que el cobre fue el único microelemento que siempre se reporta en deficiencia, esto implica que la no corrección de las deficiencias de este elemento hacen más susceptibles a las palmas de la presencia de la enfermedad; en cuanto al cinc, fue junto con el cobre y el hierro los elementos que en el periodo de predisposición fueron relacionadas sus deficiencias con mayores incidencias de la enfermedad.

Tabla 3-2: Análisis foliar hoja 17, antes y después de la epidemia.

Concentración	Elemento	Unidades	Niveles Nutricionales Hoja 17		Estudios Realizados Análisis Foliar			(%) Variación Munevar, 2001		(%) Variación Fairhurst y Mutert, 1999	
			2001-2003	2004-2006	Estudio 1 Owen, 1992 (Nivel bajo o crítico)	Estudio 2 Munevar <i>et al.</i> , 2001 (Nivel bajo o crítico)	Estudio 3 von Uexküll y Fairhurst 1991, citados por Fairhurst y Mutert, 1999 (Nivel crítico)	2001-2003	2004-2006	2001-2003	2004-2006
Macroelemento	Nitrógeno	%	2.33	2.52	2.51	2.33	2.50	100.00	108.15	93.2	100.8
	Fósforo	%	0.133	0.161	0.18	0.15	0.15	88.67	107.33	91.7	111.0
	Potasio	%	0.91	0.88	1.00	1.07	0.88	85.05	82.24	103.4	100.0
	Calcio	%	0.51	0.61	0.60	0.58	0.28	87.93	105.17	182.1	217.9
	Magnesio	%	0.19	0.23	0.24	0.24	0.20	79.17	95.83	95.0	115.0
	Azufre	%	0.12	0.19	0.22	0.22	0.20	54.55	86.36	60.0	95.0
Microelemento	Boro	mg.kg ⁻¹	12.8	18.27	14.00	15.00	8.00	85.33	121.80	160.0	228.4
	Hierro	mg.kg ⁻¹	77	90.1	N.D.	71.00	N.D.	108.45	126.90		
	Manganeso	mg.kg ⁻¹	150	141	175.00	134.00	N.D.	111.94	105.22		
	Cinc	mg.kg ⁻¹	12.8	14.9	17.50	12.40	10.00	103.23	120.16	128.0	149.0
	Cobre	mg.kg ⁻¹	3.6	3.6	3.00	4.30	3.00	83.72	83.72	120.0	120.0

Figura 3-19: Histogramas de frecuencia de los contenidos de nitrógeno en hoja 17 en los periodos de predisposición (2001-2003) y de infección (2004-2006). La línea roja corresponde con el valor crítico definido por Munevar, 2001.

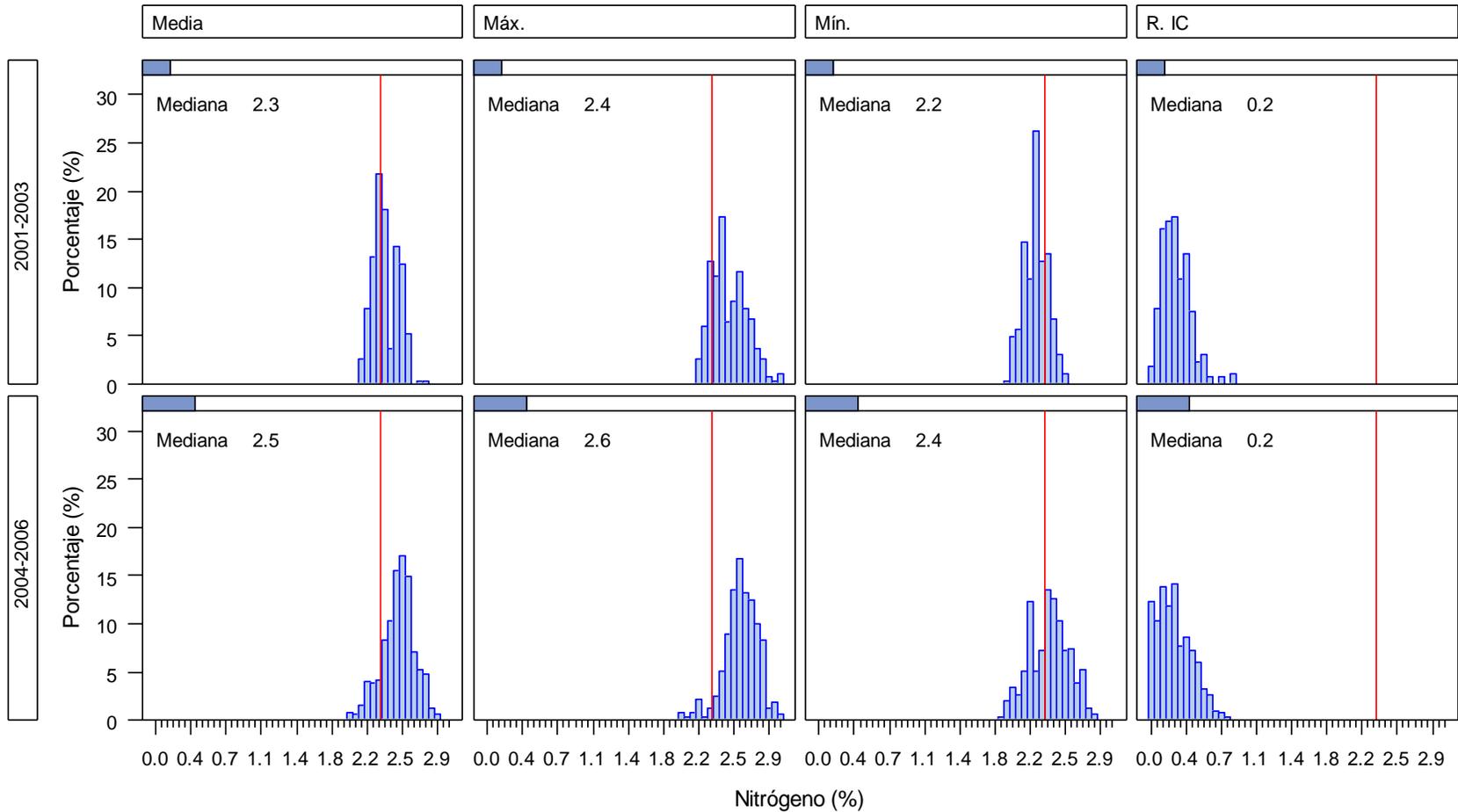


Figura 3-20: Histogramas de frecuencia de los contenidos de fósforo en hoja 17 en los periodos de predisposición (2001-2003) y de infección (2004-2006). La línea roja corresponde con el valor crítico definido por Munevar, 2001.

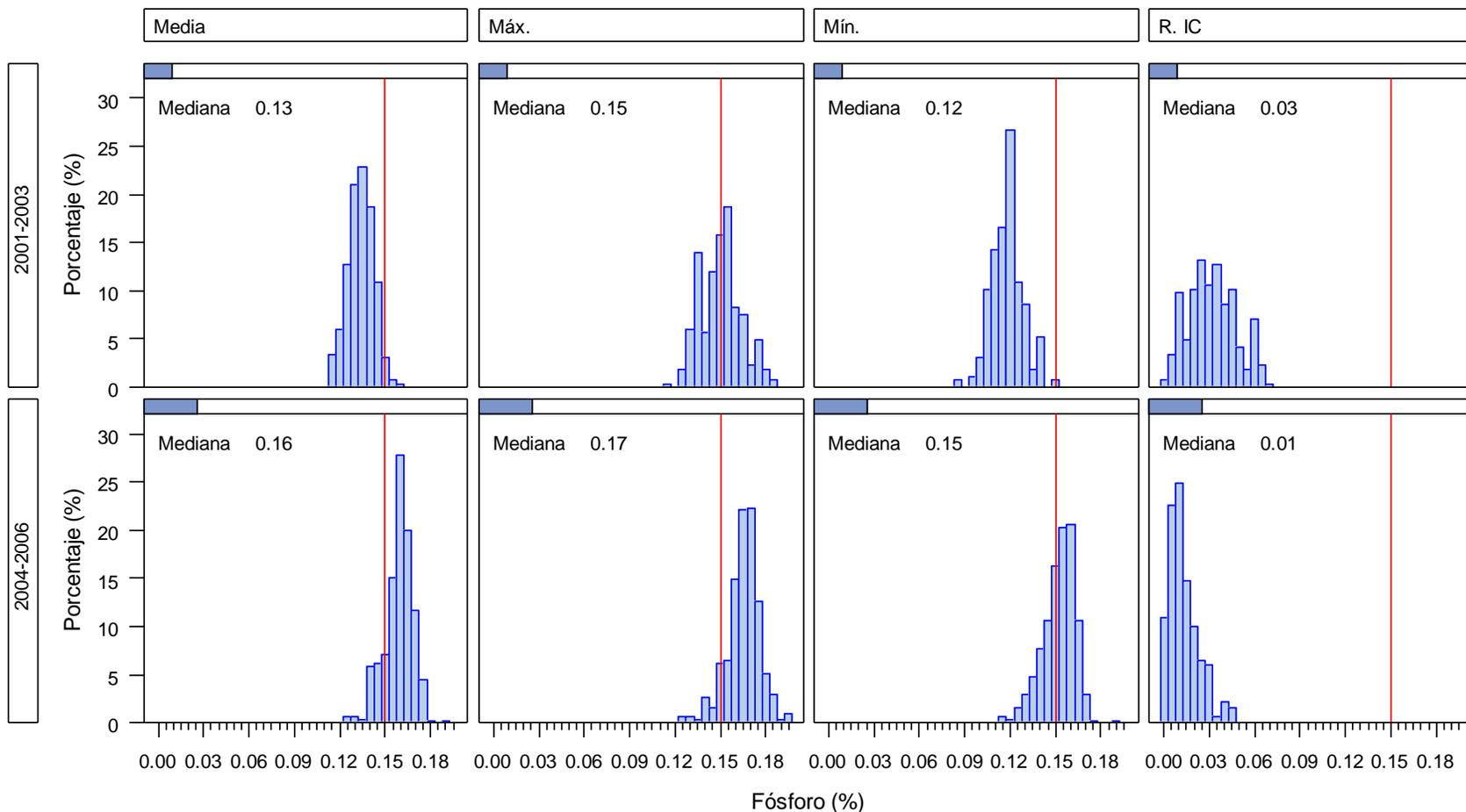


Figura 3-21: Histogramas de frecuencia de los contenidos de potasio en hoja 17 en los periodos de predisposición (2001-2003) y de infección (2004-2006). La línea roja corresponde con el valor crítico definido por Munevar, 2001.

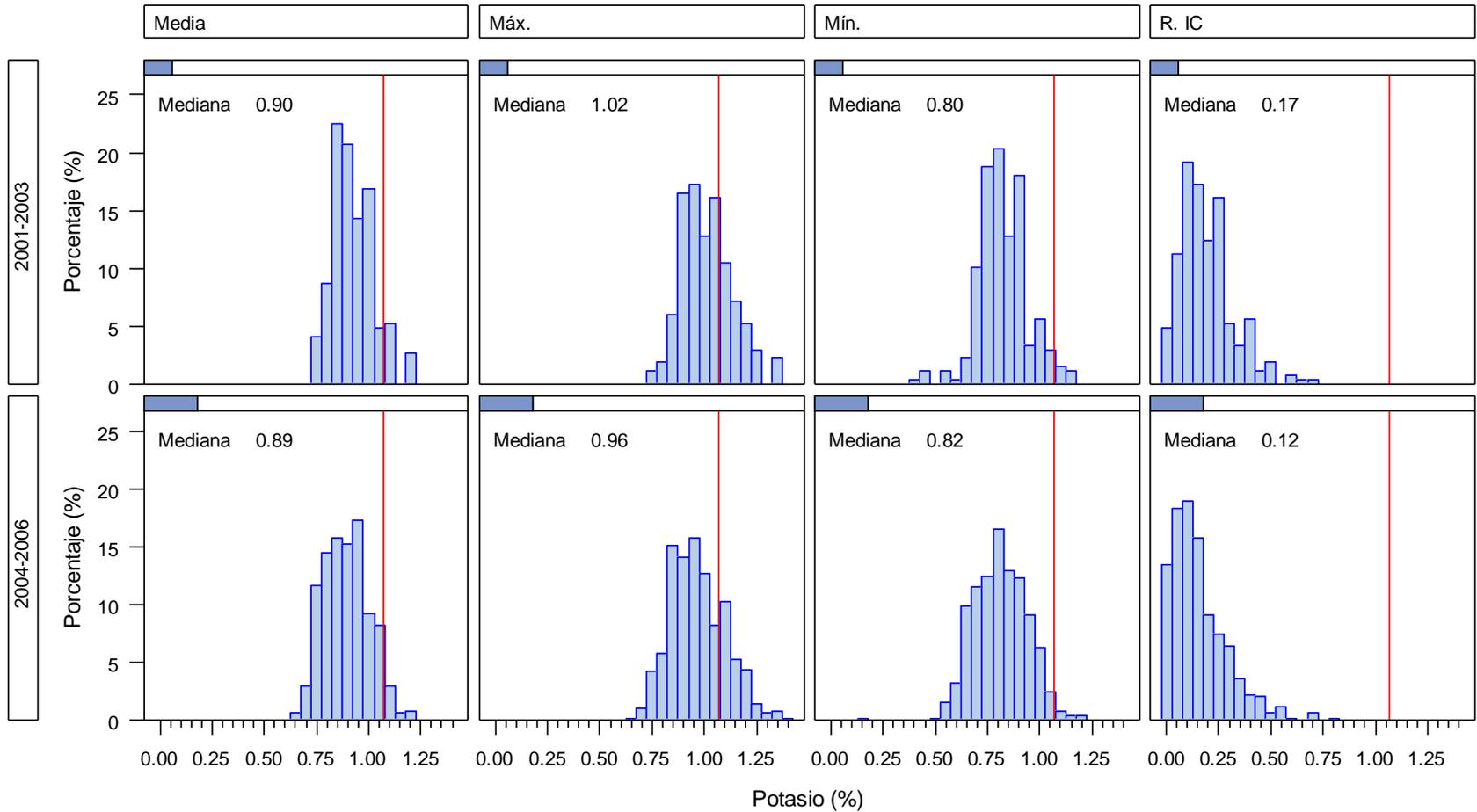


Figura 3-22: Histogramas de frecuencia de los contenidos de calcio en hoja 17 en los periodos de predisposición (2001-2003) y de infección (2004-2006). La línea roja corresponde con el valor crítico definido por Munevar, 2001.

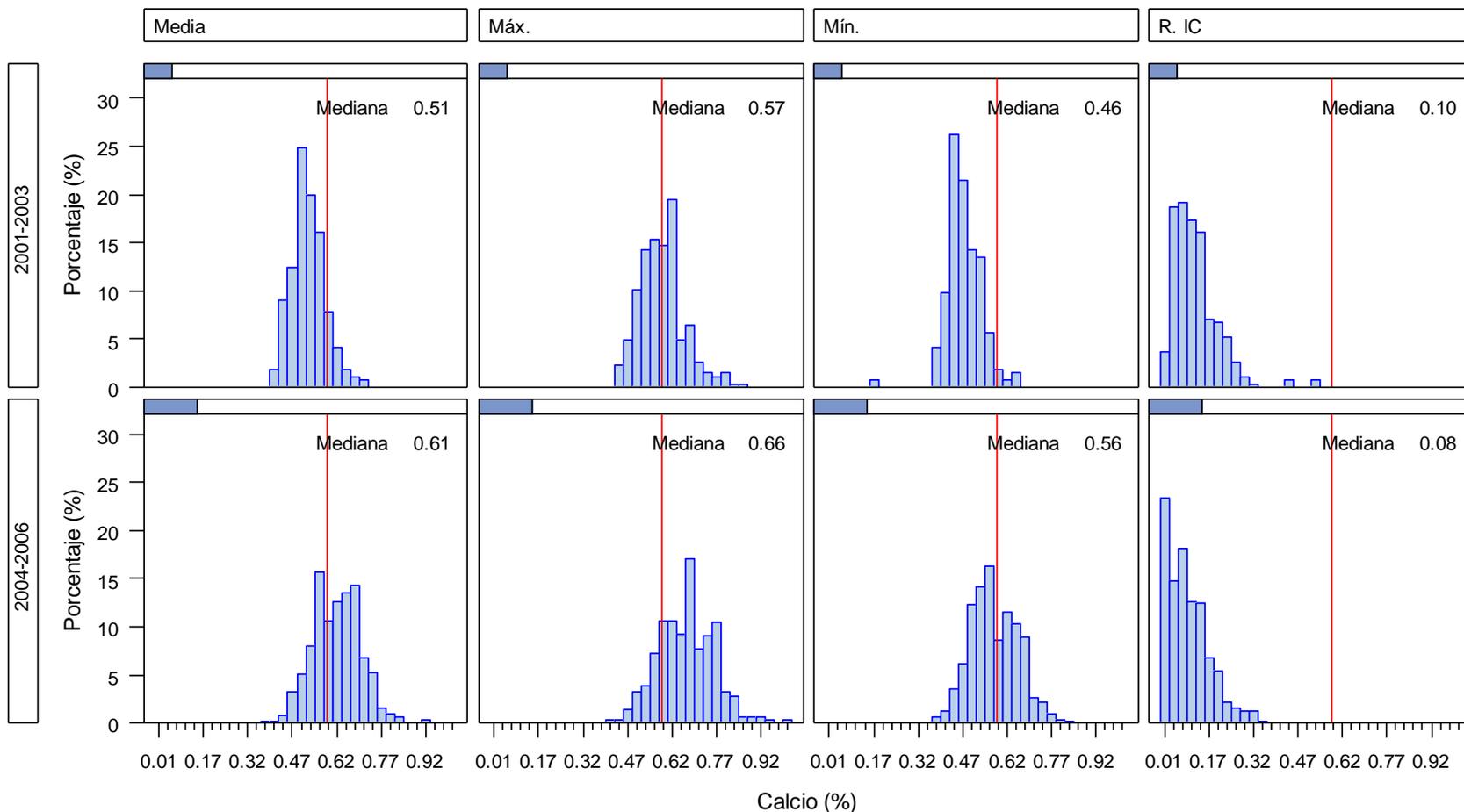


Figura 3-23: Histogramas de frecuencia de los contenidos de magnesio en hoja 17 en los periodos de predisposición (2001-2003) y de infección (2004-2006). La línea roja corresponde con el valor crítico definido por Munevar, 2001.

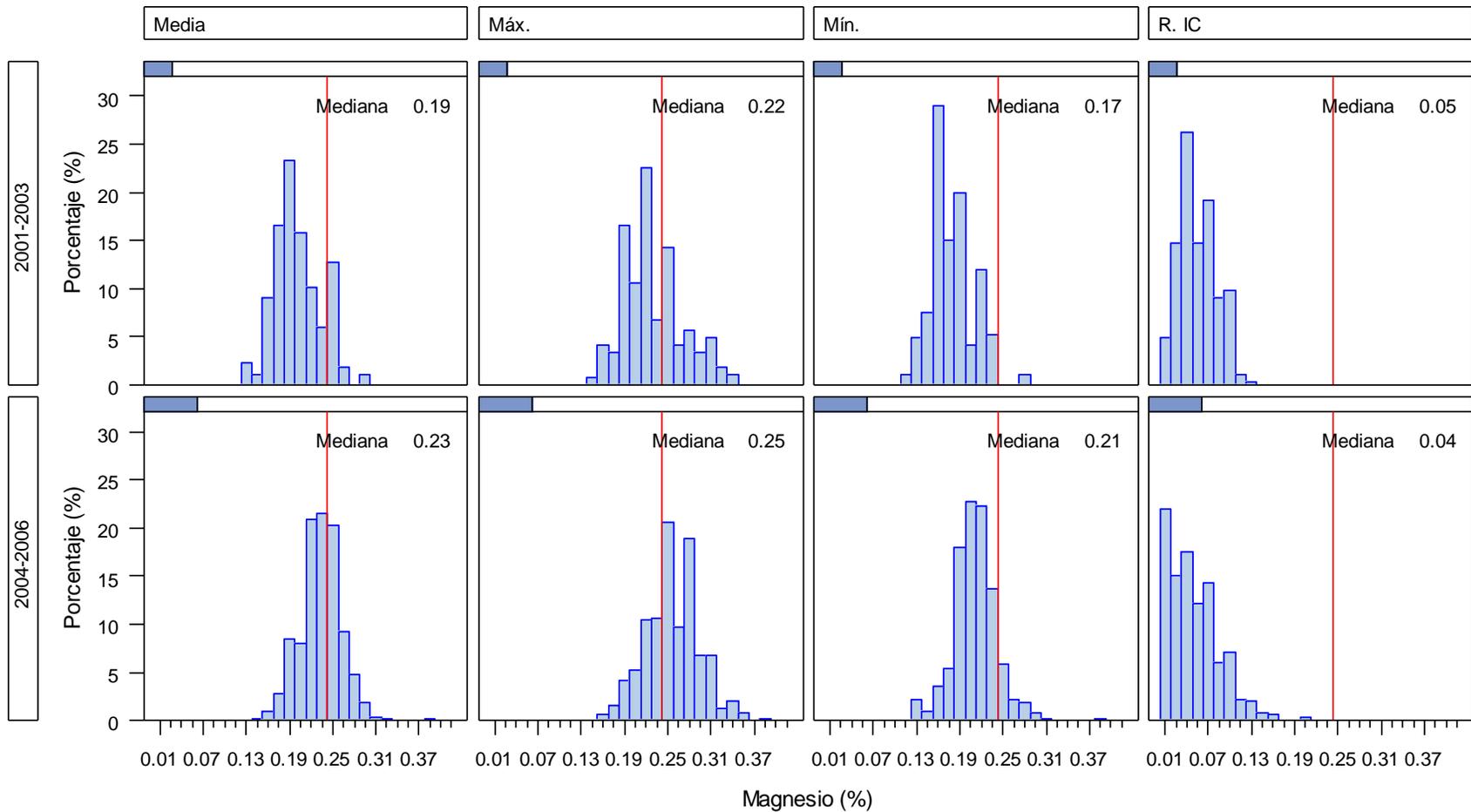


Figura 3-24: Histogramas de frecuencia de los contenidos de azufre en hoja 17 en los periodos de predisposición (2001-2003) y de infección (2004-2006). La línea roja corresponde con el valor crítico definido por Munevar, 2001.

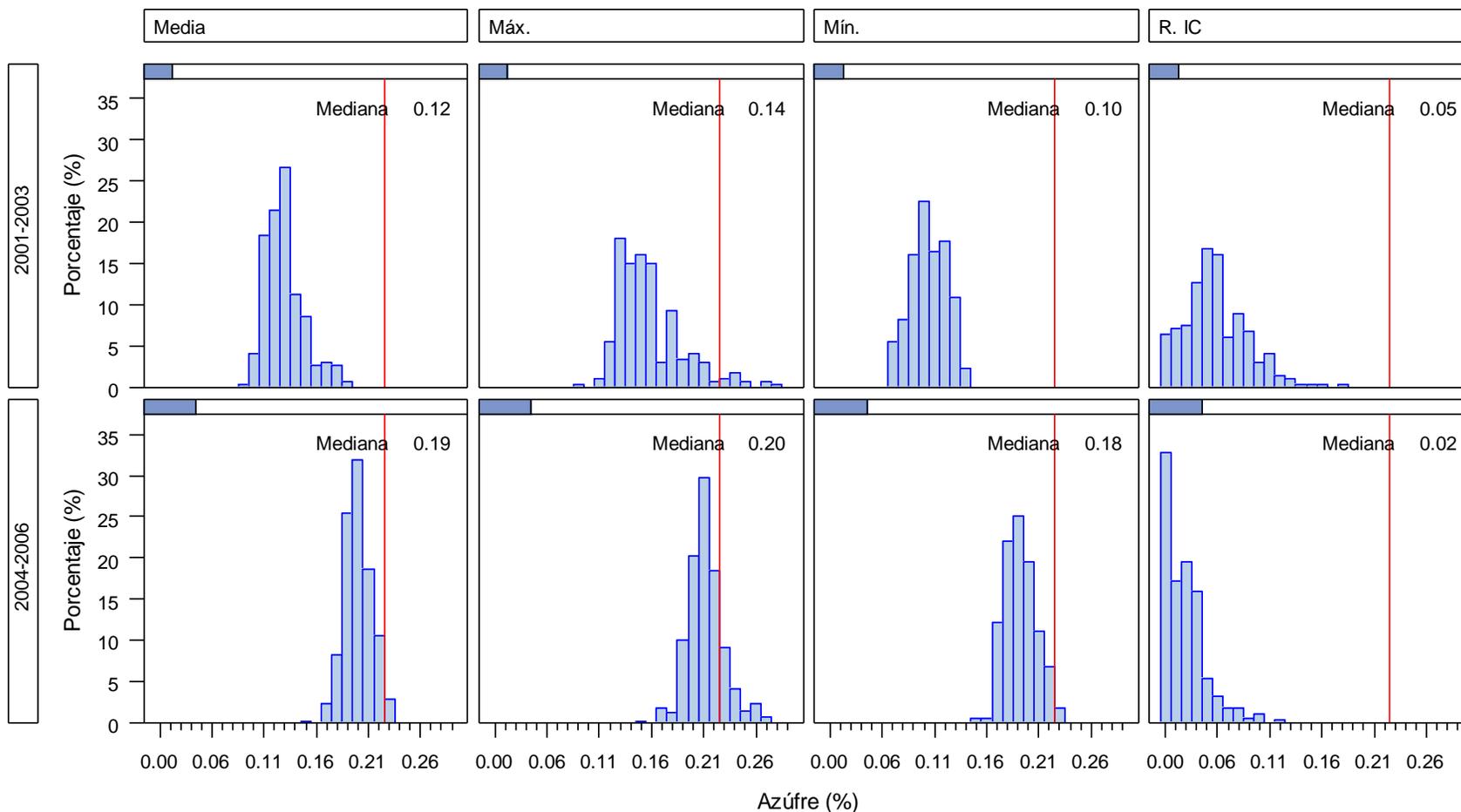


Figura 3-25: Histogramas de frecuencia de los contenidos de boro en hoja 17 en los periodos de predisposición (2001-2003) y de infección (2004-2006). La línea roja corresponde con el valor crítico definido por Munevar, 2001.

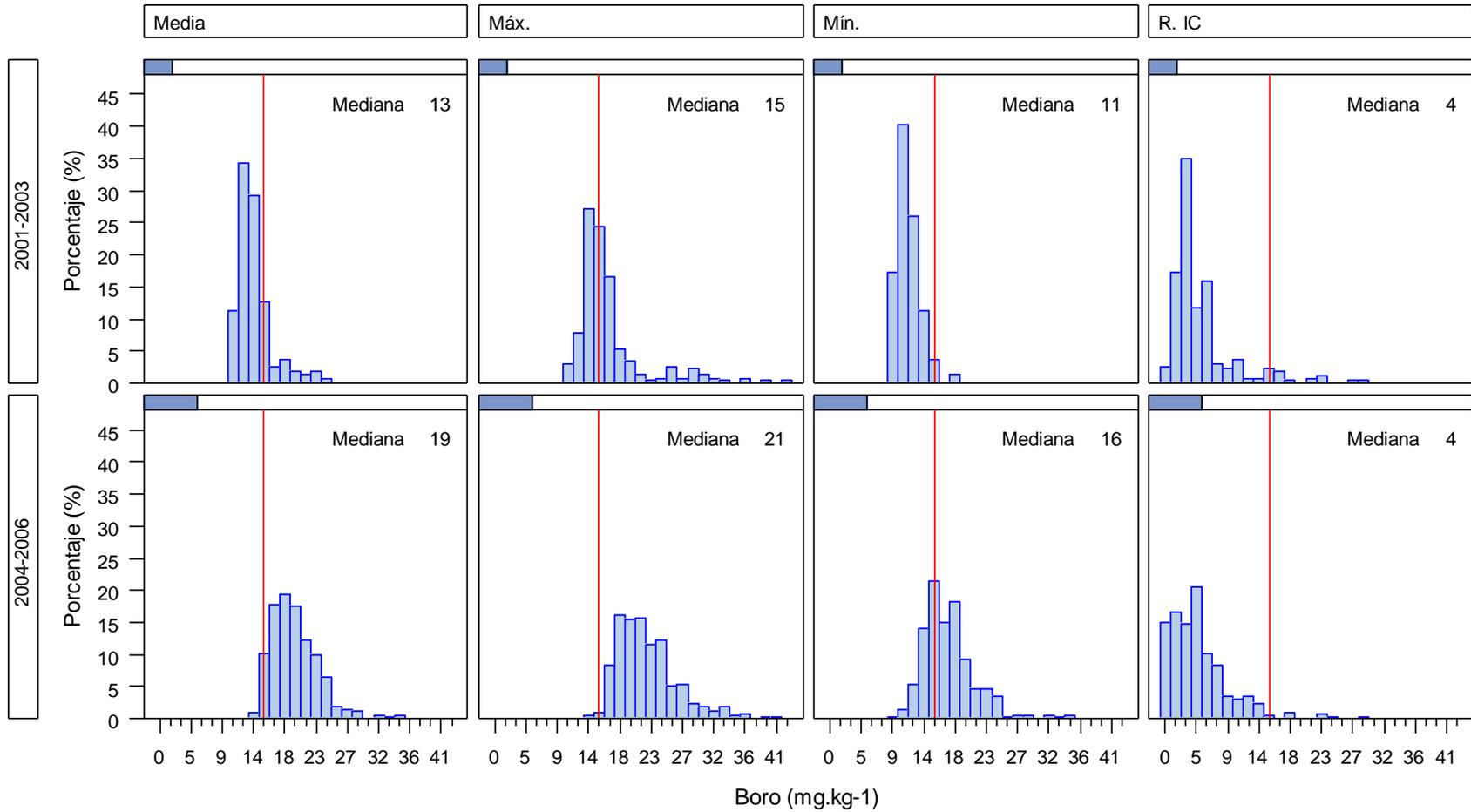


Figura 3-26: Histogramas de frecuencia de los contenidos de hierro en hoja 17 en los periodos de predisposición (2001-2003) y de infección (2004-2006). La línea roja corresponde con el valor crítico definido por Munevar, 2001.

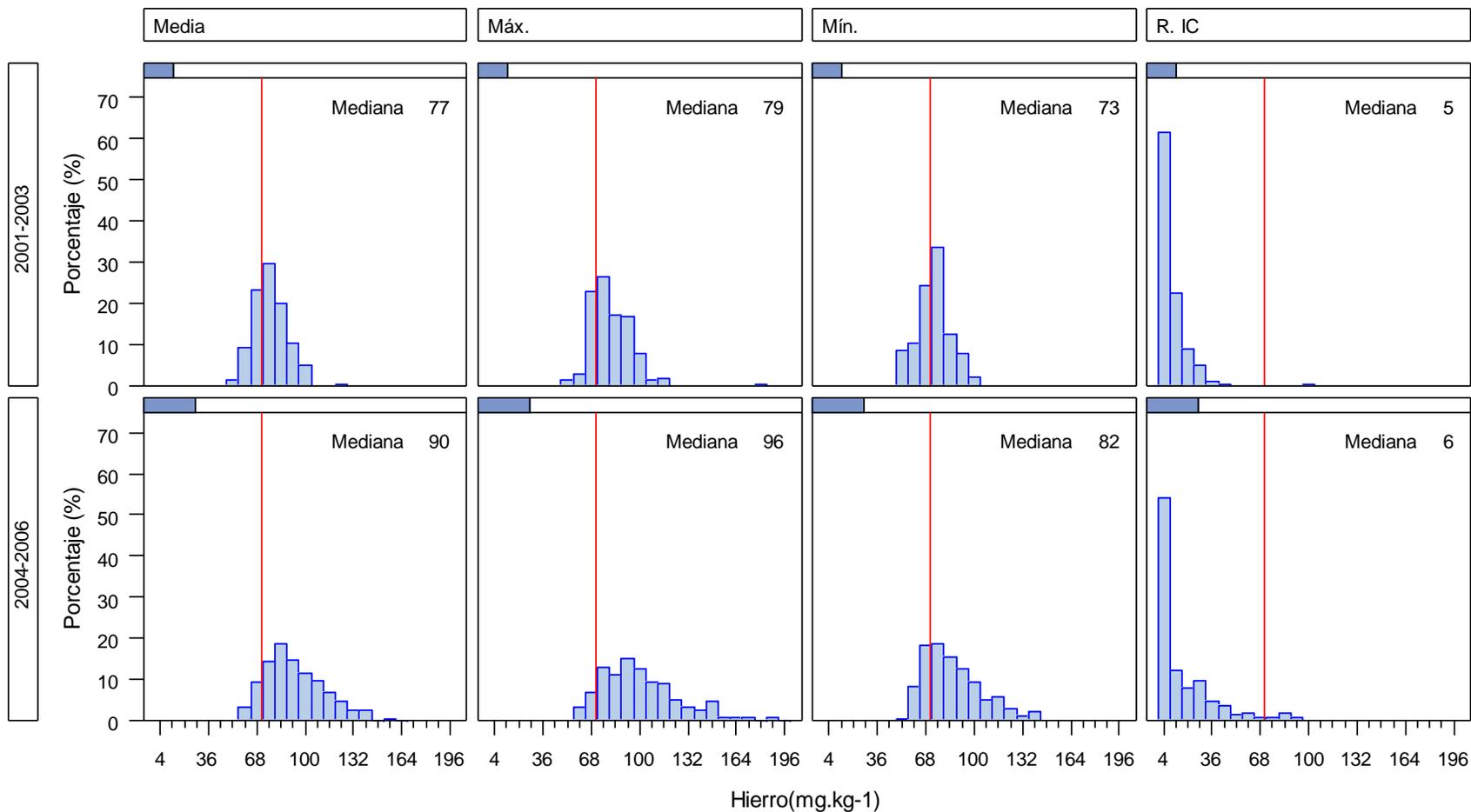


Figura 3-27: Histogramas de frecuencia de los contenidos de manganeso en hoja 17 en los periodos de predisposición (2001-2003) y de infección (2004-2006). La línea roja corresponde con el valor crítico definido por Munevar, 2001.

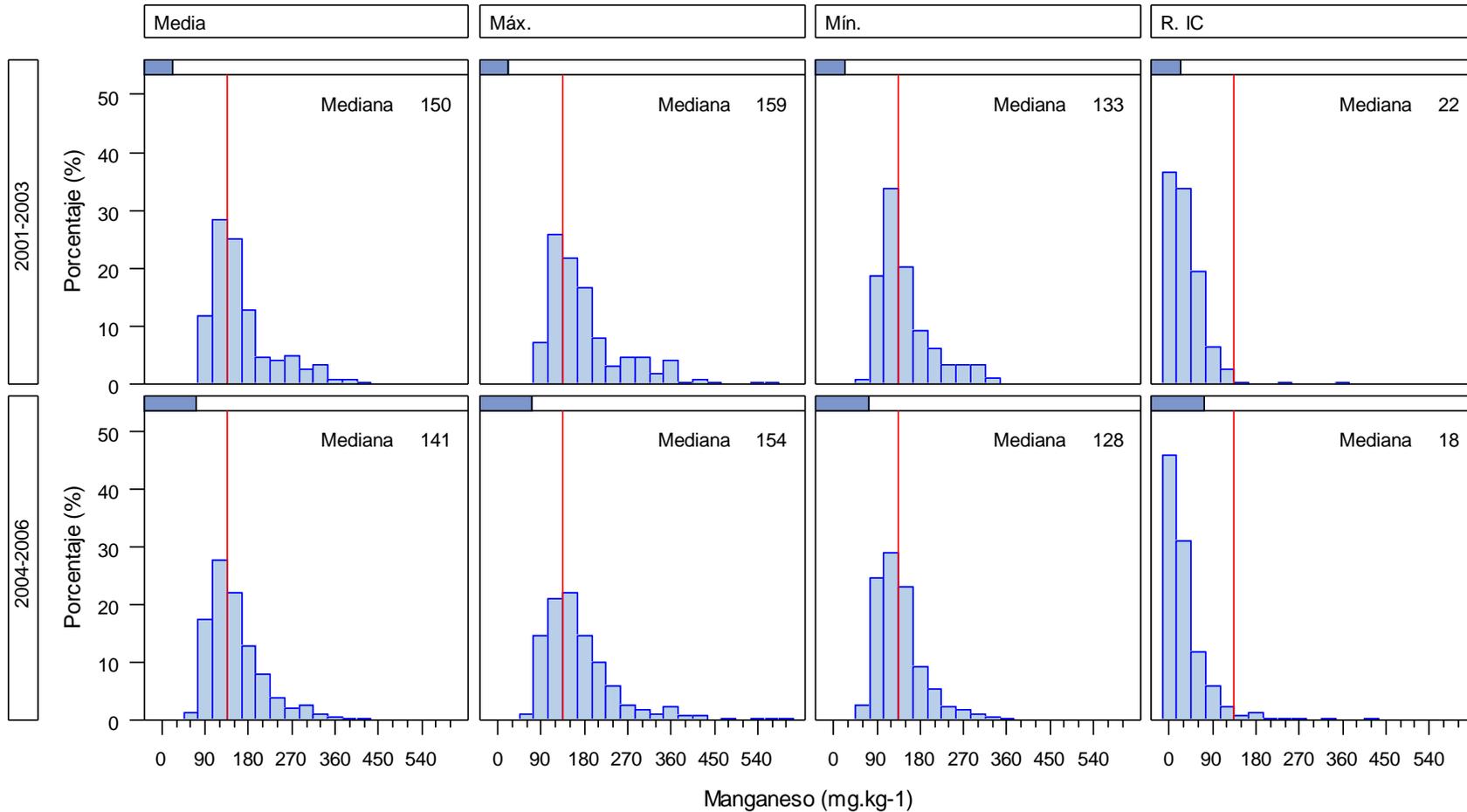


Figura 3-28: Histogramas de frecuencia de los contenidos de cinc en hoja 17 en los periodos de predisposición (2001-2003) y de infección (2004-2006). La línea roja corresponde con el valor crítico definido por Munevar, 2001.

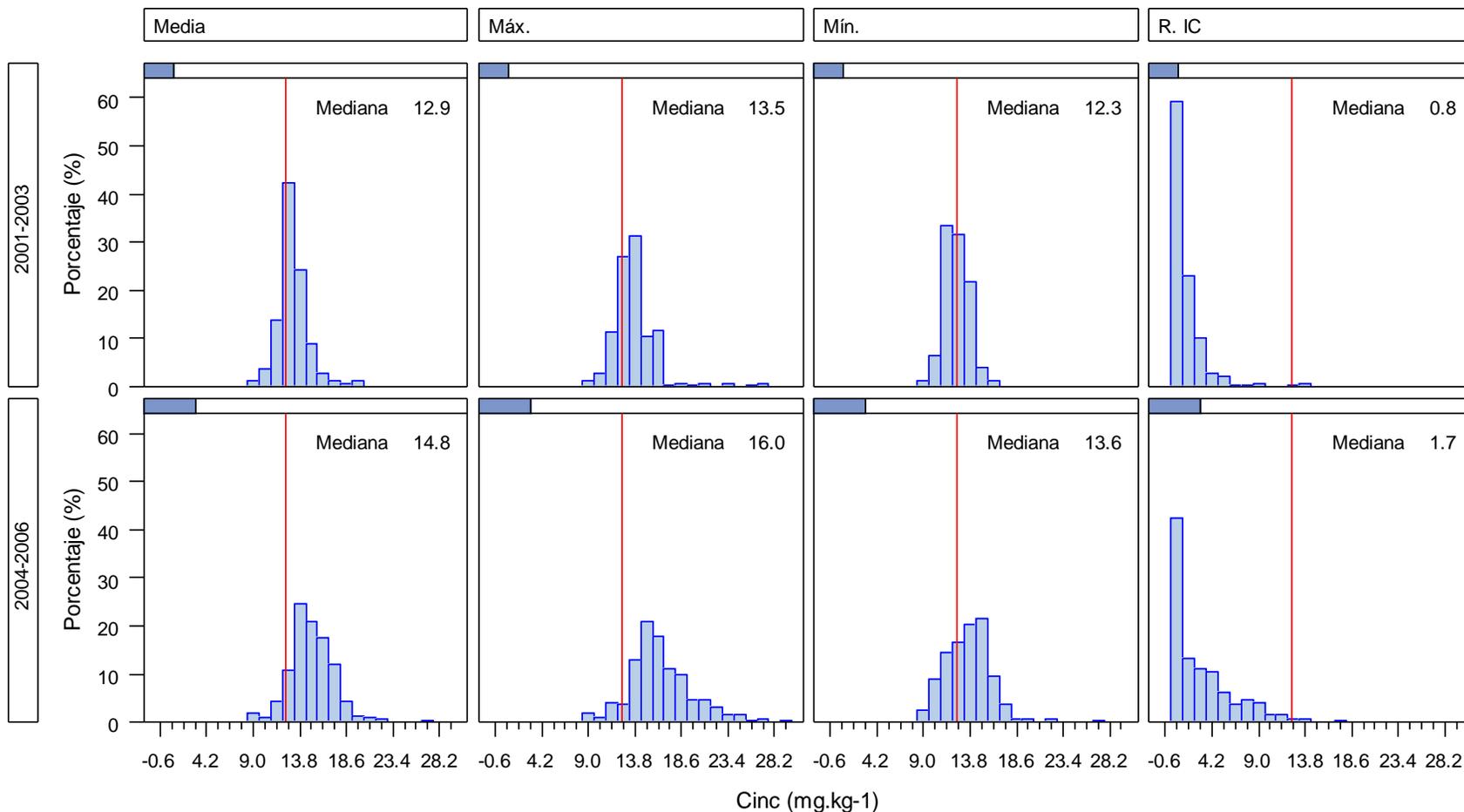


Figura 3-29: Histogramas de frecuencia de los contenidos de cobre en hoja 17 en los periodos de predisposición (2001-2003) y de infección (2004-2006). La línea roja corresponde con el valor crítico definido por Munevar, 2001.

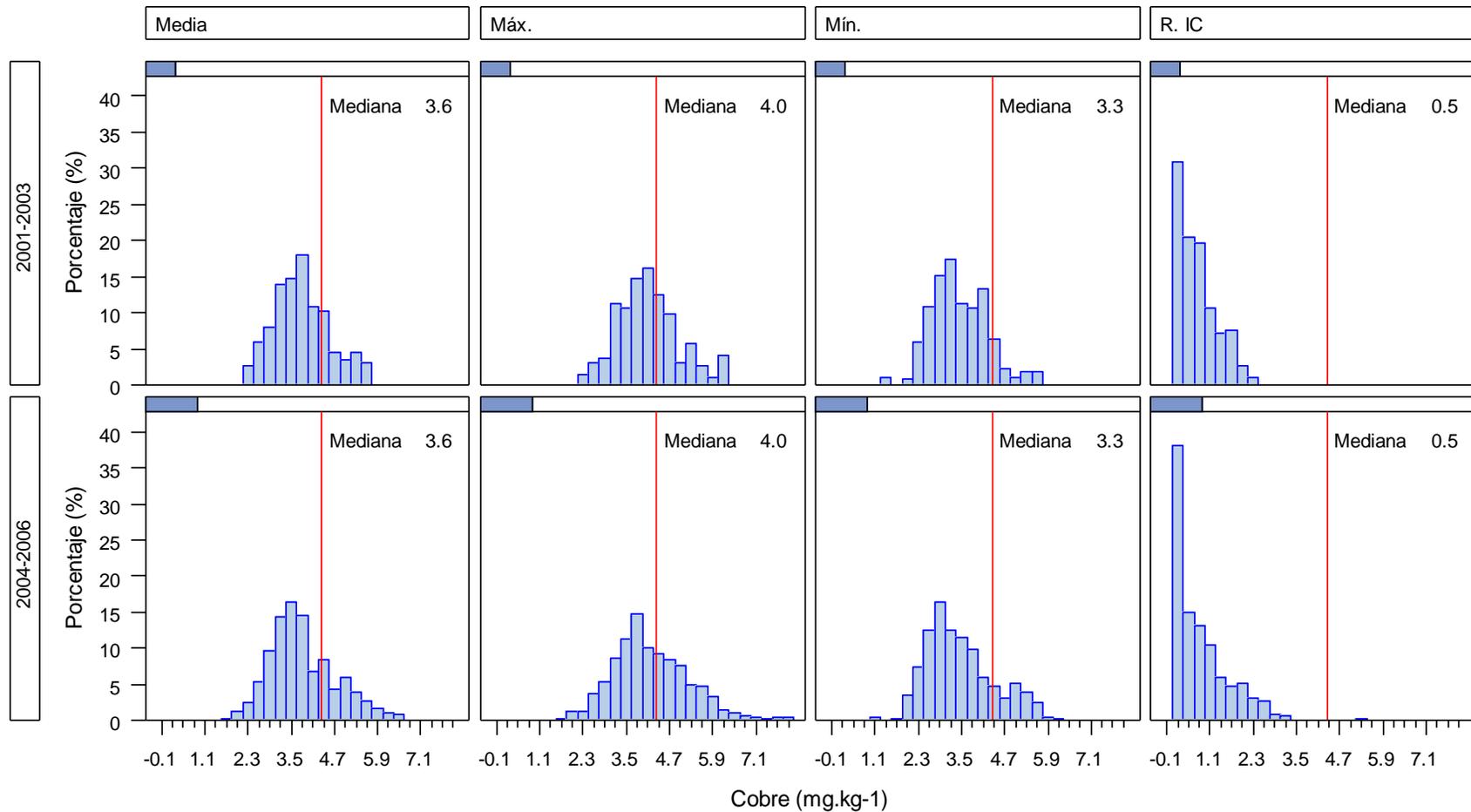
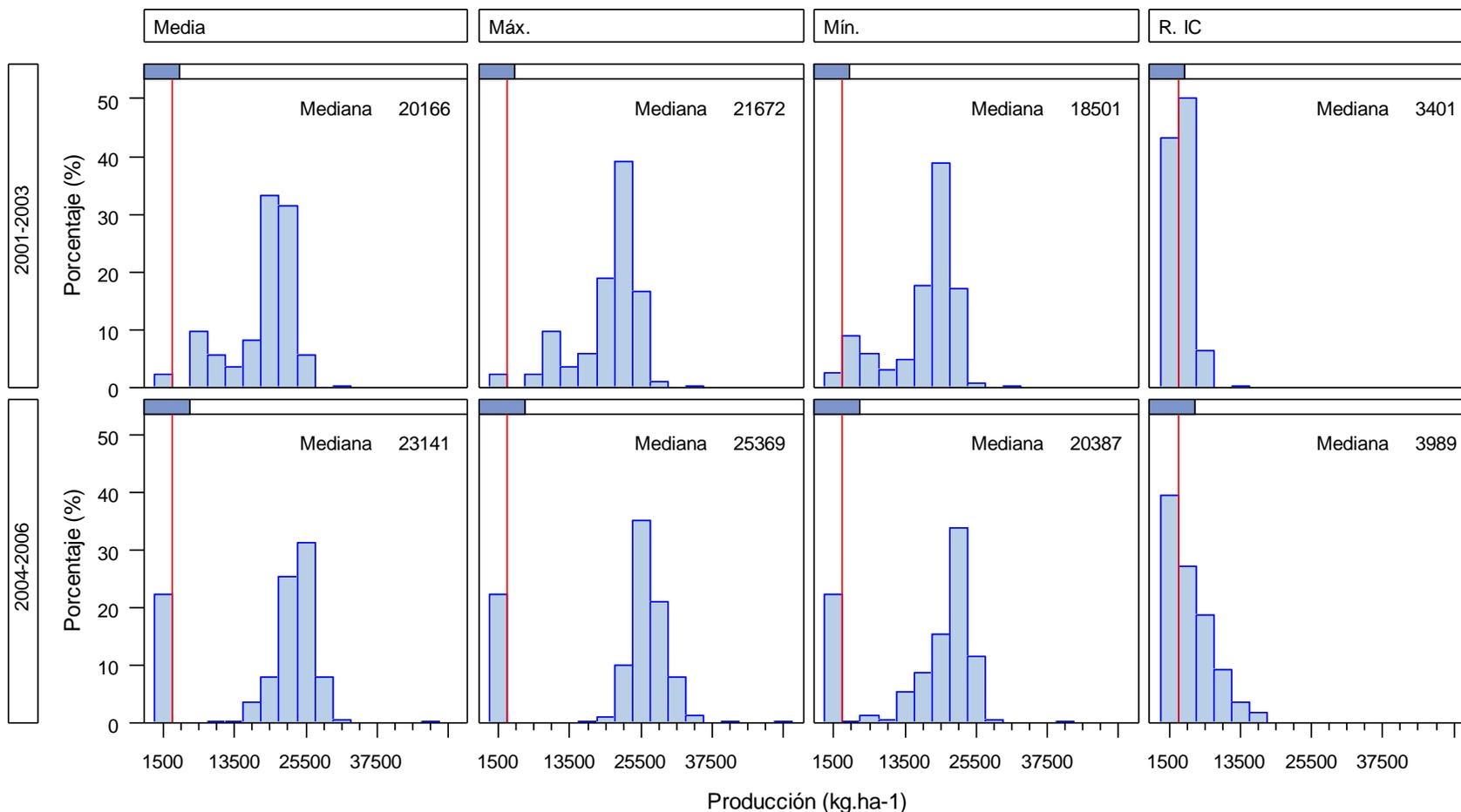


Figura 3-30: Histogramas de frecuencia de los contenidos de producción en hoja 17 en los periodos de predisposición (2001-2003) y de infección (2004-2006). La línea roja corresponde con el valor crítico definido por Munevar, 2001.



Los valores de producción fueron relacionados en general con el proceso de la epidemia en la etapa infecciosa, aquellos lotes con altas y estables productividades mostraron menor incidencia de la enfermedad que aquellos con variaciones mayores o con bajos niveles de productividad.

En cuanto a niveles de potasio se pueden explicar bajo dos perspectivas, la primera por su asociación con altos valores de nitrógeno y una correspondiente condición nutricional visual óptima que se correlacionó positivamente con la incidencia de la enfermedad y la segunda asociado indirectamente con altos contenidos de arcillas que pueden fijarlo, pero que en términos prácticos no se correlacionaría con PC (Daroub y Snyder, 2007).

En cuanto a los microelementos metálicos hierro, cinc y especialmente el cobre, que se correlacionaron de manera negativa con la enfermedad, es de esperar que esta situación se explique por la pérdida de funcionalidad del sistema inmune de las plantas las cuales en estas condiciones no pueden configurar las enzimas Súper Óxido Dismutasas (SOD) claves en los procesos rompimiento catalítico de radicales tóxicos súper oxidados (Rice, 2007).

Estos tres elementos configuran un cuadro predisponente que incluye altos crecimientos vegetativos, en apariencia óptimos, con bajo nivel de defensas del complejo de metalo enzimas del grupo SOD.

Comportamiento contrario mostró el manganeso en la etapa predisponente, la cual ya había sido reportada por Gómez, 1995, quien encontró acumulaciones de manganeso asociadas a la enfermedad, sin embargo, esto solo puede ser explicado por su relación con condiciones de encharcamiento, asociadas a PC, que hace que sea más disponible para la planta (Daroub y Snyder, 2007), y si se tiene en cuenta que el manganeso puede suplir las

funciones del magnesio y que este último para el periodo mencionado se encontraba en deficiencia, es posible considerar que este se movilizó de la zona de reservas para suplir la deficiencia del magnesio (Kochian, 1991 y Loneragan, 1998, citados por Thompson y Huber, 2007).

Por último, en cuanto a las variables agroecológicas, se tuvo en cuenta de eliminar las variables que pudieran relacionarse con una consecuencia de la PC y se confundieran con causas de la misma, como los niveles de maleza, la defoliación o el manejo de palmas espontánea, variables que son claramente afectadas por los niveles de PC pues a mayor incidencia de la enfermedad, se debe esperar una mayor cantidad de malezas en calles y platos, defoliación y un manejo deficiente de palmas espontáneas.

De las variables que quedaron para análisis fue clara la relación, en su orden de: nivel de arcillas, presencia de calle palera, estado nutricional y condiciones de drenaje deficiente, tanto por cercanía de fuentes de agua como por evidencias de encharcamiento.

En las Figuras 3-32 a 3-35 se muestran las líneas de regresión estimadas para los cuatro modelos que en general tuvieron el mejor comportamiento de acuerdo con los criterios de penalización propuestos (MSA, AIC, SBC y R^2 para el modelo completo y para el modelo con datos comunes).

Figura 3-31: Cargas factoriales del modelo con el valor más alto valor de suficiencia de muestreo (MSA).

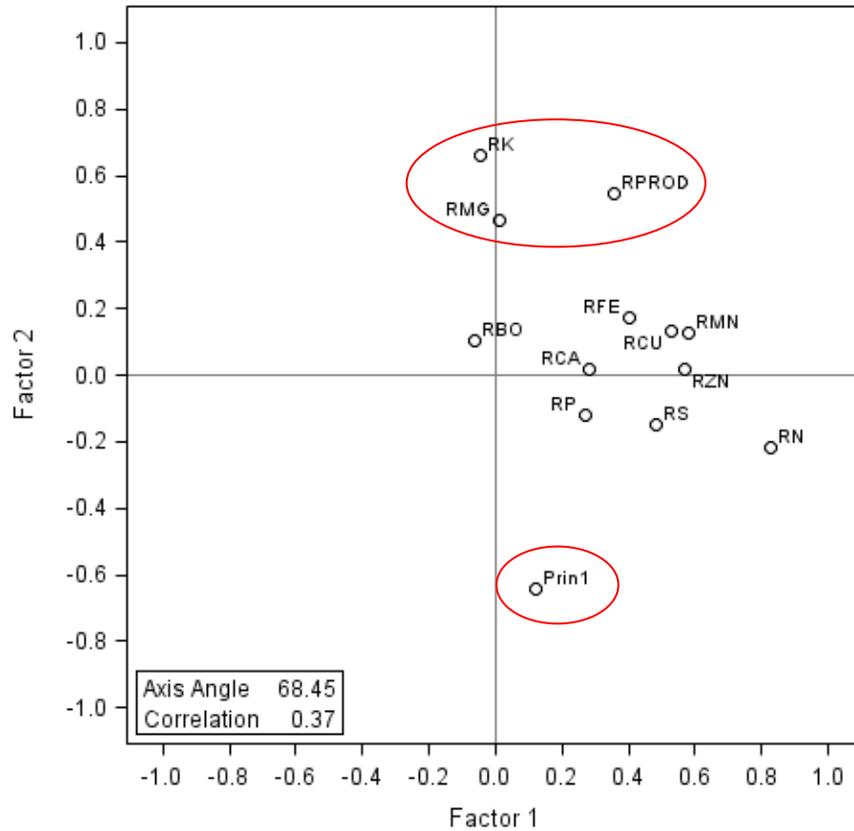


Tabla 3-3: Resumen del análisis de factores y regresión lineal, mostrando criterios de calidad y de selección del modelo.

Periodo	Tipo	Grupo de variables			MSA	Número muestras	Factores	Cargas factoriales superiores a 0.4 x 100																	R ²	Igual número de epidemias			
		Nutrición	Agroecológico	Producción				Enfermedad	Nutrición	Calle palera	Bosques	Drenaje	Caños	Arcillas	N	K	Ca	Mg	S	B	Fe	Mn	Zn	Cu		Producción	R ²	AIC	SBC
2001-2003	Min.	No	Si	Si	0.6	90	2	47	-46															3%	3%	-647	-644		
		Si	No	No	0.5	105	3	54										-45					5%	4%	-648	-646			
		Si	No	Si	0.6	105	3	54										-44					4%	3%	-647	-645			
		Si	Si	No	0.5	90	3	-57		51													12%	12%	-653	-651			
	Si	Si	Si	0.6	90	3	-54		56													12%	12%	-653	-651				
	Máx.	No	Si	Si	0.6	89	2	51	-42															3%	3%	-647	-645		
		Si	Si	No	0.5	90	3	-54	44									47	-43		41		12%	12%	-656	-653			
		Si	Si	Si	0.5	90	3	55	-43									-44	41				12%	12%	-655	-653			
	Med.	No	Si	Si	0.6	90	2	47	-46															3%	3%	-647	-645		
		Si	No	No	0.6	105	2	42							60		57				-40	-64		6%	4%	-648	-646		
		Si	No	Si	0.6	105	2	42						60		58				-40	-64		7%	5%	-649	-647			
		Si	Si	No	0.6	90	3	44										-46	55				10%	10%	-652	-650			
Si	Si	Si	0.6	90	3	46										-45	54				11%	11%	-653	-651					
RIC	No	Si	Si	0.6	90	2	50	-40														5%	5%	-649	-646				
2004-2006	Min.	Si	Si	No	0.7	222	3	48							49						50		23%	11%	-653	-651			
		Si	Si	Si	0.6	147	4	43			66		65										35%	15%	-657	-655			
	Max.	No	Si	Si	0.6	150	2	-54		75												55		33%	5%	-649	-646		
		Si	Si	No	0.7	222	3	50	44					77	68								14%	3%	-647	-645			
		Si	Si	Si	0.6	147	4	-49		78													35%	5%	-649	-647			
	Med.	No	Si	Si	0.6	151	2	-53		75												54		32%	4%	-648	-646		
		Si	Si	Si	0.6	151	2	-52		72												57		29%	6%	-650	-648		
	RIC	Si	No	No	0.7	237	2	-59												48	52		17%	12%	-655	-653			
Si		No	Si	0.7	162	2	-64						66		47						55		25%	9%	-652	-650			
Si		Si	No	0.7	222	3	49				51					54						22%	14%	-658	-655				
Si	Si	Si	0.7	147	3	-50		70						58								37%	13%	-654	-652				
Número de veces que el factor fue > 0.4								8	10	1	1	1	10	3	5	2	2	3	1	6	4	3	5	6					

Figura 3-32: Relación entre las cargas factoriales del factor asociado a la enfermedad pudrición del cogollo de la palma de aceite, relacionadas arcillas, valores mínimos de magnesio y de cobre.

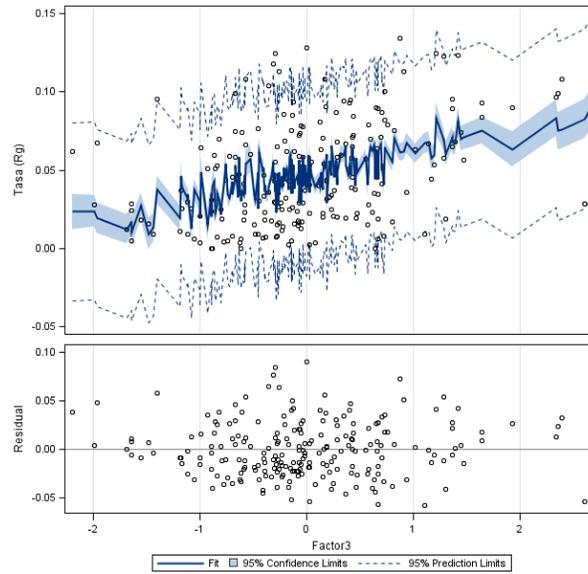


Figura 3-33: Relación entre las cargas factoriales del factor asociado a la enfermedad pudrición del cogollo de la palma de aceite, relacionadas con bosques y caños.

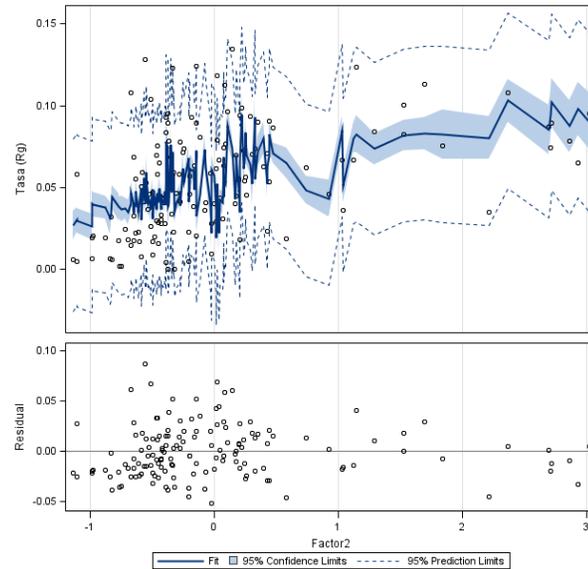


Figura 3-34: Relación entre las cargas factoriales del factor asociado a la enfermedad relacionados con drenaje, arcillas y rango intercuartil de azufre.

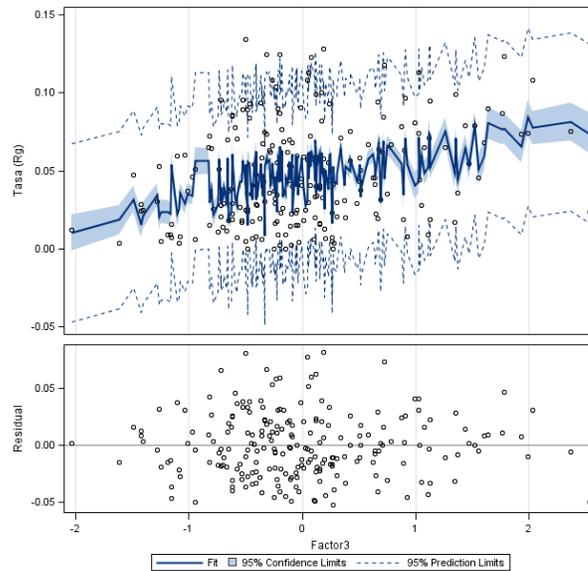
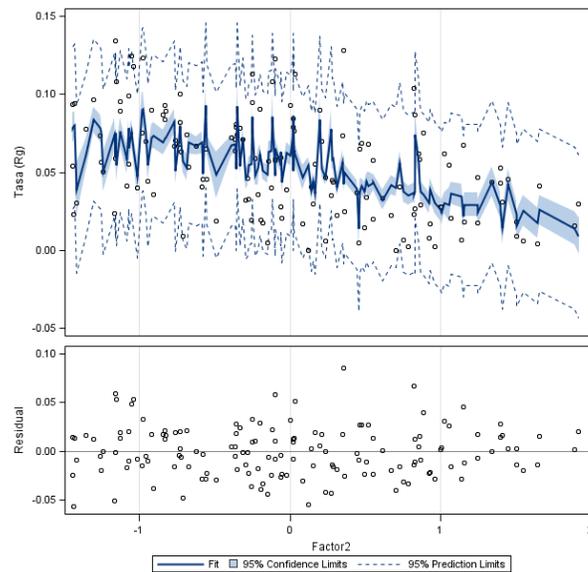


Figura 3-35: Relación entre las cargas factoriales del factor asociado a la enfermedad relacionados con calle palera, arcillas y rango intercuartil de potasio y de producción.



3.5 Consideraciones finales

Las enfermedades abióticas no tienen capacidad para crecer exponencialmente ni para reducir sus tasas si el sustrato sobre el que se desarrollan se acaba, por lo que solo es explicable el crecimiento gompertz de las epidemias de PC para una enfermedad de naturaleza biótica. Se descartan también las hipótesis de lenta evolución o de tasas variables afectadas por épocas de baja o alta precipitación.

En cuanto a la etiología de la enfermedad como lo expone Wallace, 1978 y Ostry, *et al.*, 2011, no es necesario pensar en una clase de enfermedades de categoría especial, en lugar de eso la discusión se debe centrar en las dudas que deja el enfoque etiológico a través de los postulados de Koch y el dogma del germen (Yang, *et al.*, 1976; Oostenbrink, 1969, Powell, 1971 y Wallace, 1973, citados por Wallace, 1978; Bateman, 1978, citado por Ostry *et al.*, 2011 y Scholthof, 2007). Donde los enfoques multidisciplinarios deberán ser la alternativa para solucionar la complejidad de las interacciones bióticas y abióticas de este tipo de enfermedades (Ostry *et al.*, 2011).

De igual forma la alta correlación espacial en distancias de hasta 3 km y la anisotropía del proceso espacial se pueden explicar de manera más simple por procesos patogénicos que edafológicos, donde el factor viento diurno y su mayor prevalencia en las direcciones de mayor correlación espacial puede explicar un mecanismo de dispersión de estructuras reproductivas de él o los organismos causales. Lo cual también ayudaría a explicar el porqué la enfermedad no se desplaza con la misma velocidad e intensidad en las direcciones sur y norte.

Aunque era de esperar que las variaciones en los interceptos estimados fueran bajas estas fueron suficientes para explicar un

fenómeno tan importante como el punto de inicio de la epidemia, el cual es consistente con la presencia de zonas de ronda de río, cenagosas y con mal drenaje.

Por último, la metodología empleada mostró estructuras de los datos altamente explicativas y a la vez probables, lo cual reduce la posibilidad de selección de variables con errores tipo uno altos. Además permitió identificar variables relacionadas de manera directa e indirecta con la enfermedad, lo cual es útil para los tomadores de decisiones en cualquiera de las fases del problema, ya sea a nivel de investigación o de aplicación de controles.

El modelo estimado en el presente trabajo refuerza los conceptos de:

- Inmunidad de la planta a través de enzimas que la protegen de procesos patogénicos oxidativos
- De la nutrición balanceada de la planta, que coincide desde la perspectiva agronómica de alta productividad y de la de balance fisiológico.
- De uso de suelo, en donde el cultivo de la palma aunque pueda desarrollarse en un amplio rango de ecosistemas debe ser limitado a zonas con bajo nivel de arcillas y con sistemas adecuados de drenaje.
- De conservación de la diversidad que restrinja el avance de la enfermedad en paisajes homogéneos de monocultivo.
- De integración de la comunidad, para que ella, junto con los técnicos, definan las estrategias de manejo a escala regional que impacten de manera efectiva la epidemia.

3.6 Literatura Citada

- [1] Bergamin, F., Amorim, L., Larenjeira F., Berger, R., y Hau, B. (1998). Análise temporal do amarelecimento fatal do dendezeiro como ferramenta para elucidar sua etiologia. *Fitopatologia Brasileira*, 23 (3): 391-396.
- [2] Campbell, C. y Madden, L. (1990). *Introduction to Plant Disease Epidemiology*. Jhon Wiley and Sons, New York.
- [3] Chellemi, D., Rohrbach, K., Yost, R. y Sonoda, R. (1988). Analysis of spatial pattern of plant pathogens and diseased plants using geostatistics, *Phytopath.*, 78: 221-226.
- [4] Cressie, N. (1993). *Statistics for Spatial Data*. John Wiley and Sons, Inc., New York.
- [5] Dandurand, L., Knudsen, G. y Schotzko, D. (1995). Quantification of *Pythium ultimum* var. *sporangiferum* zoospore encystment patterns using geostatistics. *Phytopath.*, 85: 186-190.
- [6] Daroub, S., y Syder, G. (2007). The Chemistry of Plant Nutrients in Soil. En: *Mineral Nutrition and Plant Disease*. Eds: Datnoff, L., Elmer, W. y Huber, D. APS, St. Paul, Minnesota USA.
- [7] Durbin, J. y Watson, G. (1951), Testing for Serial Correlation in Least Squares Regression. *Biometrika*, 37: 409-428.
- [8] Fairhurst, T. y Mutert, E. (1999). Interpretation and Management of Oil Palm Leaf Analysis data. *Better Crops International*, 13(1): 48-51.
- [9] Fleisher, S., Blom, P. y Weis, R. (1999). Sampling in precision IPM: when the objective is a map. *Phytopath.*, 89: 112-1118.
- [10] Gómez, P. (1995). Estado actual de la investigación sobre pudrición de cogollo. *Palmas*, 16(1): 9-24.
- [11] Gumpertz, M., Larkin, R. y Ristaino, J. (1997). Geostatistical Applications in Epidemiology. En: *Exercises in plant diseases epidemiology* (pp. 94-99.). The American Phytopathological Society, Minnesota.
- [12] Hatcher, L. (1994). *A step by step approach using the SAS® System for factor analysis and structural equation modeling*, Cary, NC. SAS Institute Inc. 588p.
- [13] Haiguang, W. y Ma, Z. (2011). Prediction of Wheat Stripe Rust Based on Support Vector Machine. Trabajo

- presentado en la Seventh International Conference of Natural Computation (ICNC), Julio. Shanghai.
- [14] Hughes, G., McRoberts, N., Madden, L. y Nelson, S. (1997). Validating mathematical models of plant disease progress in space and time. IMA (Ins. Math Appl.). J. Appl. Med. Biol., 14: 85-112.
- [15] Hurtado, R., Rincón, V., Mercado, H. y Latorre, D. (2009). Agricultura de precisión: Análisis exploratorio de evolución espacio-temporal de la incidencia de Pudrición del Cogollo (PC) de la palma de aceite (*Elaeis guineensis* Jacq.). Núcleo productivo de San Andrés de Tumaco. Período: enero 2007 - febrero 2008. Palmas. 30(2): 35-52.
- [16] Jaime-García, R., Trinidad, C., Felix-G., R., Nelson, M. y Orum, Y. (1996). Spatial and temporal pattern of *Phytophthora infestans* genotypes in the del Fuerte Valley, Sinaloa; México. (Abstr.) *Phytopath.*, 86:584.
- [17] Keesing, F., Holt, R., Ostfeld, R. (2006). Effects of species diversity on disease risk. *Ecology Letters*, 9(4): 485-498.
- [18] Larkin, R., Gumpertz, M. y Ristaino, J. (1995). Geostatistical analysis of *Phytophthora* epidemics development in commercial bell popper fields. *Phytopath.*, 85: 191-203.
- [19] Lecoustre, R., Fargette, C., Fauquet, C. y Reffye, de P. (1989). Analysis and mapping of the spatial spread of african Cassava Mosaic Virus using geostatistics and the kriging technique. *Phytopath.*, 79: 913-920.
- [20] Lin, L. (1989). A concordance correlation coefficient to evaluate reproducibility. *Biometrics* 45:255-268.
- [21] Lin, L., Hedayat, A., Sinha, B. y Yang, M. (2002). Statistical methods in assessing agreement: Models, issues, and tools. *J. Am. Stat. Assoc.* 97:257-270.
- [22] Little, R., Milliken, G. Stroup, W. y Wolfinger, R. (1996). SAS System for Mixed Models. SAS Institute, INC., Cary, NC.
- [23] Madden, L., Hughes, G. y Bosh, F. (2007). The study of plant disease epidemics. APS Press. 421 pp.
- [24] Magan, N., Medina, A. y Aldred, D. (2011). Positive climate-change effects on mycotoxyn contamination food crops pre- and postharvest. *Plant pathology*, 60(1): 150-163.
- [25] Martínez, G. (2010). Pudrición del Cogollo, marchitez sorpresiva, anillo rojo y marchitez letal en la palma de aceite en América. *Palmas*, 31(1): 43-54.
- [26] Munevar, F. (2001). Fertilización de la palma de aceite para obtener altos rendimientos. *Palmas*, 22(4): 9-17.

- [27] Neher, D., Reynolds, K. y Campbell, L. (1997). Analysis of Disease Progress Curves Using Linear Models. En: Exercises in plant diseases epidemiology (pp. 29-33). The American Phytopathological Society, Minnesota.
- [28] Nelson, M., Felix-Gastelum, R., Orum, t., Stowell, L. y Myers, D. (1994). Geographic Information Systems and geostatistics in the design and validation of regional plant virus management programs. *Phytopath.*, 84: 898-905.
- [29] Nelson, M., Orum, T. Jaime-García, R. y Nadeem, A. (1999). Applications of geographic information systems and geostatistics in plant disease epidemiology and management. *Plant Disease*, 83: 308-319.
- [30] Nita, M., Ellis, M. y Madden, L. (2003). Reliability and Accuracy of Visual Estimation of Phomopsis Leaf Blight of Strawberry. *Phytopathology*. 93(8): 995-1005.
- [31] Nutter, F. (1999). Understanding the relationships between botanical, human, and veterinary epidemiology: The Ys and the Rs of it all. *Ecosystem Health*, 5(3):131-140.
- [32] Ostry, M., Venette, R., y Juzwik, J. (2011). Letter to Editor: Decline as a Disease Category: Is It Helpful? *Phytopathology* 101(4):404-409.
- [33] Owen, E. (1992). Fertilización de la palma africana (*Elaeis guineensis* Jacq.) en Colombia. *Palmas*, 13(2): 39-66.
- [34] Perry, J. (1995). Spatial-analysis by distance indexes. *J. Anim. Ecol.* 64: 303-314.
- [35] Perry, J. (1998). Measures of spatial pattern for counts. *Ecology* 79: 1008-1017.
- [36] Pethybridge, S., Gent, D., Esker, P., Turechek, W., Hay, F., y Nutter, F. (2009). Site-specific risk factors for ray blight in Tasmanian pyrethrum fields. *Plant Dis.*, 93(3):229-237.
- [37] Rice, R. (2007). The Physiological Role of Minerals in the Plant. En: Mineral Nutrition and Plant Disease. Eds: Datnoff, L., Elmer, W. y Huber, D. APS, St. Paul, Minnesota USA.
- [38] SAS. (2007). SAS OnlineDoc® 9.2. Cary, NC: SAS Institute Inc.
- [39] Scholthof, K. (2007). The disease triangle: pathogens, the environment and society. *Nature Reviews Microbiology*. 5: 152-156.
- [40] Thompson, I. y Huber, D. (2007). Manganese and Plant Disease. En: Mineral Nutrition and Plant Disease. Eds: Datnoff, L., Elmer, W. y Huber, D. APS, St. Paul, Minnesota USA.

- [41] Vanderplank, J. (1963). *Plant Diseases: Epidemics and Control*. Academic Press, New York.
- [42] Waggoner, P., y Berger, R. (1987). Defoliation, Disease, and Growth. *Phytopathology*. 77(3): 393-398.
- [43] Wallace, H. (1978). The diagnosis of plant diseases of complex etiology. *Annu. Rev. Phytopathol.* 16:379-402.

4. Elementos para discusión

Un problema como la PC debe generar amplias discusiones en todos los campos de la fitopatología. Enfermedades como estas, que luego de casi 100 años todavía sigan sin responder a las preguntas básicas etiológicas, deben estar sometidas al debate constante y a la crítica constructiva. Los grupos de investigación no pueden aislarse, ni reiniciar procesos así se considere que existen errores en las metodologías y en los resultados publicados.

Las historias de los desastres epidemiológicos, con esta enfermedad, se demuestra que no son asunto del pasado. Que debacles sociales y económicas como las del cornezuelo del centeno en el siglo XVIII, o de gota en papa o roya en café en el XIX. Son tan factibles ahora como en esa época. La ilusión del control de enfermedades con pesticidas, no duró más de medio siglo. Es necesario, más ingenio, más trabajo en equipo y visiones a largo plazo y a gran escala. Inclusive la discusión de las bases epistemológicas del proceso de investigación debe revisarse pues allí existen responsabilidades no discutidas.

En este capítulo se busca una explicación a las fallas en el proceso de investigación de la PC. Se inicia con un recuento histórico de los trabajos en epidemiología contrastando los enfoques genéticos y epigenéticos y como estos generaron que el fitopatólogo que estudia esta enfermedad construyera pensamientos antagónicos irreconciliables entre el función del ambiente y del patógeno en el proceso epidémico. Este antagonismo fue reforzado por el uso de enfoques inductivos que fácilmente validaban

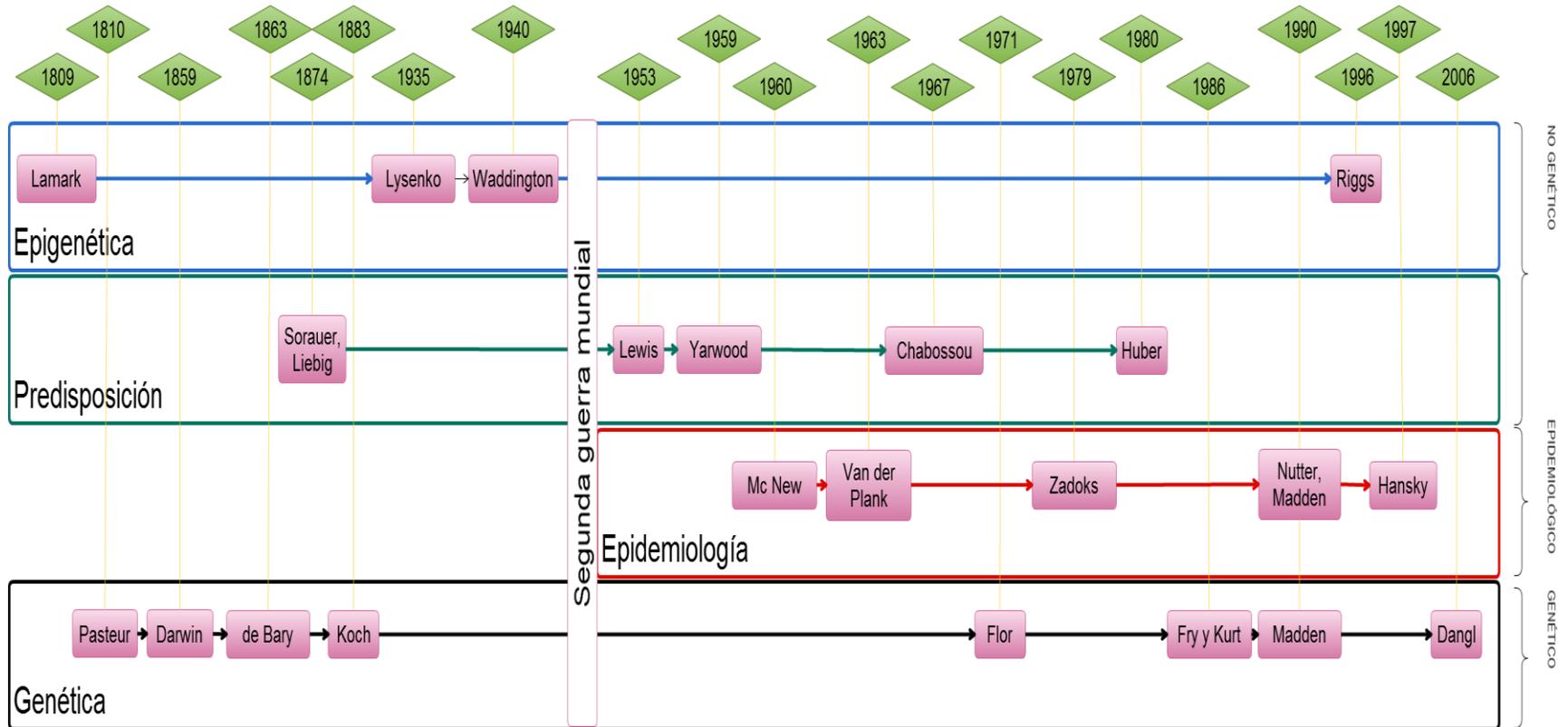
cualquiera de los enfoque bióticos o abióticos preconcebidos. Bajo estas circunstancias los modelos y métodos estadísticos solo han sido manipulados para corroborar esos trabajos, pero no para buscar respuestas a las preguntas del agricultor en cuanto al manejo de la enfermedad.

4.1 Epigenética y genética en el proceso patogénico

La fitopatología como la conocemos en la actualidad inició formalmente con los trabajos de Louis Pasteur (1860) y Anton De Bary (1863), Figura 4-1, quienes optaron por considerar verdadero el enfoque patogenésico en contra del autogénico (Zadoks, 2001). Estos autores se soportaron en los trabajos de Darwin (1859) en evolución y de Koch (1883) en estándares de pruebas de patogenicidad (Weiss, 2005), en contraposición a lo que Lamarck en 1809 proponía sobre la función del ambiente en las características heredables. Aunque en su momento las teorías de Lamarck fueron desechadas, algunos autores trataron de recuperar, con mayor o menor énfasis, algo de estas ideas, preguntando en que forma el ambiente puede afectar el desarrollo de las enfermedades: Justus Von Liebig en 1873 (citado por Haneklaus et al., 2007) y Sorauer, 1874, propusieron que el ambiente si bien no tiene capacidad para afectar el reconocimiento directo entre el patógeno y la planta, si puede predisponer o no a la infección; el tristemente célebre Lysenko, 1935, quien solo logró recuperar las teorías lamarckianas mediante engaños e intimidaciones, afortunadamente por un periodo muy breve de tiempo; y Waddington, 1940, incorporando con éxito el término epigenética para caracterizar a aquellos cambios en la expresión genética que no están relacionados con alteraciones en las secuencias de ADN y que aunque no validan la idea general de Lamarck, estas epimutaciones en algunos casos pueden pasar a la descendencia, y así podrían tener algún papel en la evolución de los seres vivos (Balter, 2000). Sin embargo, hasta antes de la segunda guerra mundial se puede afirmar que la patología vegetal

fue dominada por modelos netamente patogenicistas donde el ambiente muy poco aportaba a la explicación de una enfermedad.

Figura 4-1: Diagrama de la historia de la fitopatología: contraste entre los modelos epigenéticos y los genéticos. Y como la epidemiología interviene en el proceso para unificar las dos vertientes en un solo modelo



Al llegar la segunda guerra mundial se presenta un cambio tecnológico en la agricultura, Cochrane, 1979, citado por Antle, 1984, sugiere que aunque la investigación en agricultura hizo avances importantes durante la década de 1930, los agricultores no disponía de incentivos económicos para adoptarlas, y que este proceso solo se dio con el advenimiento de la posguerra. En Europa, donde el uso de pesticidas antes de la década de 1930 se limitaba a la preparación de cobre, azufre o cal, de la misma forma que el uso de la tierra, pasa, en la posguerra, a sistemas de producción intensivo con una significativa reducción en la diversidad del paisaje, (Lowe, 1992; Robinson y Sutherland, 2002) y fuertes impactos sociales (Lowe, 1992).

Es este hito histórico que pone a prueba el esquema patogenésico y luego de casi 100 años se reinicia la investigación para identificar de qué forma se pueden controlar las enfermedades con alternativas diferentes al uso de pesticidas. Lewis, 1953 propone la hipótesis balanceada del parasitismo y Yarwood, 1959, sienta las bases conceptuales de la predisposición. Sin embargo, el concepto que considera a los nutrientes en el mantenimiento y la promoción de la sanidad de los cultivos solo recibió alguna atención en las décadas de 1960 y 1970, la investigación en mecanismos de resistencia o estudios en campo fue limitada ya fuera por lo complejo del tema o por la carencia de reconocimiento de sus significancia práctica en tiempos donde los pesticidas químicos al parecer era efectivos, no obstante, en la actualidad, las críticas al uso de pesticidas y a su efectividad han generado mayores presiones a los investigadores para la búsqueda de alternativas de control que no hagan uso de pesticidas y los trabajos que redefinen el papel del ambiente en el desarrollo de las epidemias se han incrementado significativamente.

Sin embargo, no se puede desconocer que el enfoque patogenésico entendió la necesidad de incorporar variables ambientales en la

explicación del ciclo infeccioso y para eso se apoyo en la disciplina de la epidemiología, la cual fue estructurada sobre las propuestas del triángulo de la enfermedad de Mc New, 1960 y de curvas de progreso de epidemias de Vanderplank, 1963. Sin embargo, estos modelos epidemiológicos muestran al ambiente solo como un mecanismo de distribución y difusión del patógeno en el ambiente, sin impacto en la relación directa planta-patógeno, inclusive los aportes de Zadoks, 1979, sobre el tetraedro de la enfermedad, apuntan en esta misma dirección.

Como en su momento sucedió con Lysenko y la teoría lamarckiana, con Chabossou en 1967 se lleva al extremo el concepto de predisposición, dándole nuevamente al ambiente (nutrición) todo el peso dentro del proceso patogénico. Algo similar sucedió por la misma época con Flor, 1971, y el enfoque biótico, quien consolida la teoría patogenésica al encontrar que las relaciones planta-patógeno dependen de genes de virulencia y de avirulencia, repartidos respectivamente, sin considerar ningún tipo de modulación ambiental en estas relaciones. Esta radicalización en los enfoques se sigue dando y es solo con los trabajos de Huber, 1980, de Nutter, 1990, y de Riggs, 1996, que la fitopatología comienza a ver en todas las direcciones, inclusive en otras disciplinas como la estadística, la epidemiología humana o la ecología del paisaje, para responder a la pregunta sobre la causalidad de las enfermedades.

4.2 Enfoque científico

Bajo este panorama se iniciaron las investigaciones en PC, donde el enfoque patogenésico imperaba y respuestas alternativas tenían el precedente de ser aproximaciones pseudocientíficas al problema. El dominio de este enfoque en investigación obligaba a los fitopatólogos a buscar evidencias bióticas de la causalidad de la PC, las cuales no eran difíciles de hallar, solo que dependiendo

del investigador el agente causal variaba, lo que llevó a un círculo de trabajos sobre patogenicidad que no mostraron ningún avance, Figura 1-5.

Aunque inicialmente los investigadores encargados de trabajar en la etiología de la PC han operado de manera deductiva, contrastando sus hipótesis contra supuestos generales y validándolas respecto a la evidencia encontrada, han fallan de manera importante en las fases posteriores pues asumen que la evidencia encontrada es suficiente para mantener sus teorías etiológicas, luego de lo cual no han sido capaces de dar explicación a las veces en que sus teorías no se cumplen bajo condiciones diferentes. Su empeño se centra en seguir demostrando sus hallazgos sin preocuparse por explicar el porqué de las veces que no se da su predicción. En su momento lo fue con los factores predisponentes o con el hallazgo de *Phytophthora palmivora* o de *Thielaviopsis paradoxa* entre muchos otros. En epidemiología humana, esta problemática ya ha sido ampliamente discutida, Banegas et al., 2000, expone el contraste entre los epidemiólogos popperianos y los inductivistas, pidiendo más humildad en el establecimiento de hipótesis de trabajo pues se debe ser consciente de que no operamos inductivamente y en consecuencia no podemos establecer firmemente una hipótesis, ni siquiera afirmarla probabilísticamente. En resumen, la radical defensa de Popper a lo empírico (García, 2000).

Esto ha traído como consecuencia que para Colombia el manejo de la PC haya variado en función de los modelos etiológicos que se publicaban. Inicialmente el equipo de Nieto presentó un plan de manejo químico de la enfermedad basado en los resultados positivos de *Thielaviopsis sp.*, *Pythium sp.* y *Fusarium sp.*, como agentes causales de la enfermedad, utilizando los ingredientes activos Carbendazim, Clorotalonil, Captan y Triadimefon (Martínez et al., 1997), pero sus controles no lograron reducir significativamente

la enfermedad, y su trabajo no se continuó. Luego, para Munevar et al., 2001, el manejo de la PC se basó en el concepto de factores predisponentes, y gran parte del manejo de la enfermedad hecho en los Llanos Orientales obedeció a este enfoque (Palmas, 2008). Sin embargo, nuevamente el modelo en uso es objetado y Sarria, et al., 2008, retoma el modelo de origen biótico inicialmente propuesto por el equipo de Nieto, con una propuesta similar, es decir, dirigida a la exclusión del patógeno por medios químicos y físicos. Sin embargo, estos resultados son recientes y aun no es claro el plan de manejo de la enfermedad bajo este enfoque.

Bajo estas circunstancias, las recomendaciones para el manejo se concentran en la erradicación de la enfermedad, las cuales no van dirigidas a ningún organismo en particular: fungicidas de amplio espectro, uso de desinfectantes, eliminación de tejido afectado, aplicación de inductores de resistencia y modificación de las condiciones ambientales (Torres et al., 2008).

4.3 Propuesta de enfoque

Es claro que un proceso patogénico debe ser explicativo, donde se haga cada vez más énfasis en la necesidad de involucrar al patógeno en los modelos clásicos de epidemiología espacial y temporal, identificando a nivel genético los patógenos (Archie et al., 2009), o haciendo una sinergia entre la epidemiología clásica y la genética de poblaciones (Milgroom y Peever, 2003), sin embargo, los avances serán lentos si este enfoque no trata de abordar el problema desde un enfoque complejo (Wallace, 1978 y Ostry, et al., 2011), complementándose con acercamientos de naturaleza empírica: Pethybridge et al., 2009, propone modelos de pronóstico, utilizando regresión logística para la pudrición radial en piretros; Pfender, 2009, pronostica pérdidas de producción en pastos con modelos de regresión lineal; Olantínwo et

al., 2008, igualmente pronostica epidemias de virus en maní con regresiones no lineales y múltiples, Te Beest et al., 2008, aplica algoritmos Window Pane para construir modelos empíricos para mildes, o Nelson et al., 1994, utiliza modelos espaciales holísticos en el diseño de planes de manejo regional de *Phytophthora* en tomate, entre otros. Inclusive, en casos como el de la PC el enfoque epidemiológico empírico antes que el fitopatológico clásico de "una causa-una enfermedad", debería primar, en donde no se tiene claridad sobre el agente causal, no se conocen materiales genéticos que puedan ser tolerantes al ataque y los efectos del ambiente interactúan de un sitio a otro en el desarrollo de las epidemias Wallace, 1978, Scholthof, 2007, Haigaung y Ma, 2011 y Ostry, et al., 2011. No obstante el uso de este enfoque trae riesgo principalmente en la selección de factores de riesgo y su significación en el proceso epidémicos, por lo que se debe estar alerta en la violación de los siguientes supuestos de los análisis estadísticos:

- No protección contra tasas de error tipo I, y en consecuencia relaciones significativas cuando no lo son (Milliken y Johnson, 1985; Martínez y Martínez, 2007). Como en el caso de los estudios de Laing, 2011.
- Descarte de relaciones significativas entre la enfermedad por incremento de sus errores estándar por efectos de multicolinealidad (Allison, 1999). Como en el caso de Cristancho, 2007.
- Seudorrelicas, donde las hipótesis planteadas no corresponden con las efectivamente evaluadas (Hurlbert, 1984) o confundir las relaciones causa-efecto con relaciones de simple asociación o relaciones inversas efecto-causa. Como en el caso de Acosta y Munevar, 2003.

La epidemiología de plantas no solo en el caso de la PC es una disciplina que no ha recibido la atención necesaria por los fitopatólogos, se ha preferido actuar en función de modelos simples en factores y niveles, con escasa capacidad predictiva, las interacciones de los factores se han dejado en un segundo plano y el ambiente ha sido limitado en la explicación de los patosistemas. A pesar de la fuerte influencia de los modelos complejos nos hemos resistido a abordar este enfoque, ya sea por desconocimiento de las metodologías o por excesiva confianza en los modelos clásicos fitopatológicos. No obstante, el agricultor clama por respuestas y los fitopatólogos no podemos seguir escudándonos en las tranquilas aguas de los paradigmas que hasta el momento no han logrado detener el avance de las epidemias.

4.4 Literatura citada

- [1] Acosta, A. y Munevar, F. (2003). Bud Rot in oil Palm Plantations: Link to soil Physical propertiess and Nutrient Status. *Better Crops International* 17(2): 22-25.
- [2] Allison, P. (1999). *Logistic Regression, Using the SAS System*. SAS Institute Inc. 4 Edición.
- [3] Antle, J. 1984. The structure of U.S. agricultural technology, 1910-78. *American Journal of Agricultural Economics*, 66(4):414-421
- [4] Archie, E., Luikart, G., y Ezenwa, V. (2009). Infecting epidemiology with genetics: a new frontier in disease ecology. *Trends in Ecology & Evolution*, 24(1):21-30.
- [5] Balter. M. (2000). Was Lamarck Just a Little Bit Right? *Science, New Series*. 288(5463): 38.
- [6] Banegas, J., Rodríguez, F. y del Rey. (2000). Popper y el Problema de la Inducción en Epidemiología. *Revista Española de Salud Pública*. 74(4): 327-339.
- [7] Boller, T., y He, S. (2009). Innate immunity in plants: an arms race between pattern recognition receptors in plants and effectors in microbial pathogens. *Science*, 324(5928): 742-744.
- [8] Campbell, C. y Madden, L. (1990). *Introduction to plant disease epidemiology*. John Wiley & Sons.

- [9] Chaboussou, F. (1967). La trophobiose ou les rapports nutritifs entre la Plante-hôte et ses parasites. *Ann. Soc. Ent.Fr.* 3(3):797-809.
- [10] Cristancho, J., Castilla, C., Rojas, M., Munevar, F. y Silva, J. (2007). Relación entre la saturación de Al, Mg, K y la tasa de crecimiento de la pudrición de cogollo de la palma de aceite en la Zona Oriental colombiana. *Palmas* 28(2): 25-36.
- [11] Darwin, C. (1859). *The Origin of Species by Means of Natural Selection*. John Murray.
- [12] Datnoff, L., Elmer, W. y Huber, D. (2007). *Mineral nutrition and plant disease*. The American Phytopathological Society.
- [13] De Bary, M. (1863). Recherches sur le développement de quelques champignons parasites. Mémoire pour servir de réponse à une question proposée par l'Académie des Sciences en 1861 et pour servir de supplément aux travaux sur la question des générations dites spontanées. *Ann. Sci. Naturelles. Partie Botanique. 4me Série*, 20: 5-148.
- [14] Flor, H. (1971). Current status of the gene-for-gene concept. *Annu. Rev. Phytopathol.* 9:275-296.
- [15] García, F. (2000). La Fascinación por Popper en la Epidemiología Contemporánea. *Revista Española de Salud Pública.* 74(4): 323-326.
- [16] Gilligan, C. y Van den Bosch, F. (2008). Epidemiological Models for Invasion and Persistence of Pathogens. *Annu. Rev. Phytopathol.* 46:385-418.
- [17] Gómez, P. (1995). Estado actual de la investigación sobre pudrición de cogollo. *Palmas*, 16(1): 9-24.
- [18] Haiguang, W. y Ma, Z. (2011). Prediction of Wheat Stripe Rust Based on Support Vector Machine. Trabajo presentado en la Seventh International Conference of Natural Computation (ICNC), Julio. Shanghai.
- [19] Halden, P. (2011). Opinion: Adaptation, redundancy or resilience. *EMBO Reports* 12(9):872.
- [20] Haneklaus, S., Bloem, E., Schung, E. (2007). Sulfur and Plant Disease. En: *Mineral Nutrition and Plant Disease*. Eds: Datnoff, L., Elmer, W. y Huber, D. APS, St. Paul, Minnesota USA.
- [21] Huber, D. (1997). Manejo de la nutrición para el combate de patógenos de plantas. *Agronomía Costarricense.* 2(1):99-102.

- [22] Hurlbert, S. (1984). Pseudoreplication and the Design of Ecological Field Experiments. *Ecological Monographs*, 54(2): 187-211.
- [23] Jeger, M. (2004). Analysis of disease progress as a basis for evaluating disease management practices. *Annu. Rev. Phytopathol.* 42:61-82.
- [24] Jones, J. y Dangl, J. (2006). The plant immune system. *Nature* 444(16):323-329.
- [25] Judelson, H. y Blanco, F. (2005). The spores of *Phytophthora*: weapons of the plant destroyer. *Nature Reviews*, 3:47-58.
- [26] Laing, D. (2011). La deficiencia transitoria de calcio como causa primordial de la pudrición de cogollo en palma de aceite. *Informaciones Agronómicas*. 3: 26-53
- [27] Lamarck, J. (1809). *Philosophie Zoologique*. Biblioteca filosófica y social.
- [28] Lewis, R. (1953). An outline of the balanced hypothesis of parasitism. *Am. Nat.* 87:273-81.
- [29] Londoño, D. y Pinto, D. (2004). Análisis de decisiones. En: *Epidemiología clínica, investigación clínica aplicada*. Eds.: Ruiz, Á. y Morillo, L. Editorial Médica Panamericana.
- [30] Lowe, P. 1992. Industrial agriculture and environmental regulation: a new agenda for rural sociology. *Sociologia Ruralis*, 32(1):4-10.
- [31] Lysenko, T. (1948). *The Situation in the Science of Biology*. Birch Book Unlimited.
- [32] Madden, L., Hughes, G. y Bosh, F. (2007). *The study of plant disease epidemics*. APS Press, 421 pp.
- [33] Magan, N., Medina, A., y Aldred, D. (2011). Possible climate-change effects on mycotoxin contamination of food crops pre- and postharvest. *Plant Pathology*, 60(1): 150-163.
- [34] Martínez, J., Nieto, L., Hernández, M. (1997). Efecto de algunos fungicidas en el control del Complejo de Pudrición del Cogollo de la palma de aceite (*Elaeis guineensis* Jacq.). *Palmas*, 18(4):9-16.
- [35] Martinez, R. y Martinez, N. (1997). *Diseño de Experimentos. Analisis de datos estándar y no estándar*. Fondo Nacional Universitario. Santa fé de Bogotá. 479p
- [36] McNew, G. (1960). The nature, origin, and evolution of parasitism. In *Plant Pathology: An Advanced Treatise* (Eds: Horsfall, J. y Dimond, A.). Academic Press, New York.
- [37] Milgroom, M., y Peever, T. (2003). *Population biology of plant pathogens: The Synthesis of Plant Disease*

- Epidemiology and Population Genetics. *Plant Disease*, 87(6): 608-617.
- [38] Milliken, G. y Johnson, D. (1985). *Analysis of Messy Data*. Lifetime learning publication, 473p
- [39] Morales, G. y Ruíz, J. (2004). Estudio de cohortes. En: *Epidemiología clínica, investigación clínica aplicada*. Eds.: Ruíz, Á. y Morillo, L. Editorial Médica Panamericana.
- [40] Morillo, L. (2004). Estudios de corte transversal. En: *Epidemiología clínica, investigación clínica aplicada*. Eds.: Ruíz, Á. y Morillo, L. Editorial Médica Panamericana.
- [41] Munevar, F. (2001). Fertilización de la palma de aceite para obtener altos rendimientos. *Palmas*, 22(4): 9-17.
- [42] Nelson, M., Felix-Gastelum, R., Orum, T., Stowell, L. y Myers, D. E. (1994). Geographic information systems and geostatistics in the design and validation of regional plant virus management programs. *Phytopathology* 84:898-905.
- [43] Nutter 1990???
- [44] Olatinwo, R., Paz, J., Brown, S., Kemerait, R., Culbreath, A., Beasley, J., y Hoogenboom., G. (2008). A Predictive Model for Spotted Wilt Epidemics in Peanut Based on Local Weather Conditions and the Tomato spotted wilt virus Risk Index. *Phytopathology* 98(10): 1066-1074.
- [45] Ostry, M., Venette, R., y Juzwik, J. (2011). Letter to Editor: Decline as a Disease Category: Is It Helpful? *Phytopathology* 101(4):404-409.
- [46] Palmas. (2007). Editorial: Enfermedades en palma de aceite: un reto a la sostenibilidad de la agroindustria. *Palmas* 28(1): 5-8.
- [47] Palmas. (2008). Editorial: Acercamiento científico a la solución del problema de la pudrición del cogollo de la palma de aceite. *Palmas*, 29(3):5-6.
- [48] Pasteur, L. (1860). Expériences relatives aux générations dites spontanées. *CR hebd. Séanc. Acad. Sci. Paris*. pp. 303-307.
- [49] Pethybridge, S., Gent, D., Esker, P., Turechek, W., Hay, F., y Nutter, F. (2009). Site-specific risk factors for ray blight in Tasmanian pyrethrum fields. *Plant Dis.*, 93(3):229-237.
- [50] Pfender, W. (2009), A Damage Function for Stem Rust of Perennial Ryegrass Seed Crops. *Phytopathology* 99(5): 498-505.
- [51] Popper, K. (1959). *La lógica de la investigación científica*. Madrid: Tecnos; 1985. Systems: Principles,

- Techniques, Management, and Applications. New York: John Wiley.
- [52] Restrepo, C. y Ardila, J. (2004). Estudio de casos y controles. En: *Epidemiología clínica, investigación clínica aplicada*. Eds.: Ruiz, Á. y Morillo, L. Editorial Médica Panamericana.
- [53] Riggs, 1996????
- [54] Robinson, R., y Sutherland, W. 2002. Post-war changes in arable farming and biodiversity in Great Britain. *Journal of Applied Ecology* 39(1): 157-176.
- [55] Ruíz, Á. (2004). Medicina basada en la evidencia. En: *Epidemiología clínica, investigación clínica aplicada*. Eds.: Ruiz, Á. y Morillo, L. Editorial Médica Panamericana.
- [56] Sarria, G., Torres, A., Aya, H., Ariza, J., Rodríguez, J., Velez, D., Varón, F. y Martínez, G. (2008). *Phytophthora* sp. es el responsable de las lesiones iniciales de la pudrición de cogollo (PC) de la palma de aceite en Colombia. En: *Palmas*, 29 (Especial): 31-41.
- [57] Scheiner, S. (1993). Introduction: Theories, Hypothesis, and statistics. En: *Design and analysis of Ecological Experiments*. Eds.: Scheiner, S. y Guerevitch, J. Chapman & Hall. 445 pp.
- [58] Schoeneweiss, D. (1975). Predisposition, Stress, and Plant disease. *Annu. Rev. Phytopathol.* 13:193-211.
- [59] Scholthof, K. (2007). The disease triangle: pathogens, the environment and society. *Nature Reviews Microbiology.* 5: 152-156.
- [60] Sorauer, P. (1974). *Handbuch der Pflanzkrankheiten*. Wiegandt, Berlin: Hempel und Parey.
- [61] Te Beest, D., Paveley, N., Shaw, M. y van den Bosch, F. (2008). Disease-Weather Relationships for Powdery Mildew and Yellow Rust on Winter Wheat. *Phytopathology*, 98(5): 609-617
- [62] Teng, P. (1985). Construction of predictive models: 2 Forecasting Crop losses. En: Gilligan, C. (pp. 179-206). *Mathematic Modeling of Crop Disease*. Academic Press, Londres.
- [63] Thompson, I. y Huber, D. (2007). Manganese and plant disease. En: *Mineral Nutrition and Plant Disease*. Eds: Datnoff, L., Elmer, W. y Huber, D. APS, St. Paul, Minnesota USA.
- [64] Torres, G., Sarria, G., Salcedo, S., Varon, F., Aya, H., Ariza, J., Morales, L. y Martínez, G. (2008). Opciones de manejo de la pudrición del cogollo (PC) de la palma de

- aceite en áreas de baja incidencia de la enfermedad. *Palmas* 29(3):63-72.
- [65] Vanderplank, J. (1963). *Plant Diseases: Epidemics and Control*. Academic Press, New York.
- [66] Wallace, H. (1978). The diagnosis of plant diseases of complex etiology. *Annu. Rev. Phytopathol.* 16:379-402.
- [67] Waddington 1940???
- [68] Waggoner, P. y Aylor, D. (2000). Epidemiology, a science of patterns. *Annual Review of Phytopathology*, 38: 1-24.
- [69] Weiss, R. (2005). Robert Koch: the grandfather of cloning? *Cell*, 123: 539-542.
- [70] Yarwood, C. (1959). Predisposition. En: *Plant Pathology*. Eds.: Horsfall, J. y Dimond, A. New York & London: Academic.
- [71] Zadoks, J. y Schein, R. (1979). *Epidemiology and Plant Disease Management*. Oxford University Press, New York.
- [72] Zadoks, J. (2001). Plant disease epidemiology in the twentieth century: a picture by means of selected controversies. *Plant Disease*. 85(8):808-816.