



UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA

Desarrollo de modelos predictivos de Sigatoka negra (*Mycosphaerella fijiensis* M. Morelet) en banano para la región de Urabá, Antioquia – Colombia

Juan Camilo Gómez Correa

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Ciencias Agrarias, Departamento de Ciencias Agrarias
Medellín, Colombia

2017

Desarrollo de modelos predictivos de Sigatoka negra (*Mycosphaerella fijiensis* M. Morelet) en banano para la región de Urabá, Antioquia – Colombia

Juan Camilo Gómez Correa

Tesis presentada como requisito parcial para optar al título de:

Magister en Ciencias Agrarias

Director:

Dr. Sc. Darío A. Castañeda Sánchez

Codirectora:

Dr. Sc. Lilliana M. Hoyos Carvajal

Línea de Investigación:

Salud Pública Vegetal

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Ciencias Agrarias, Departamento de Ciencias Agrarias

Medellín, Colombia

2017

*Si dejas obra, muere tranquilo, confiado en
unos pocos buenos amigos.*

Andrés Caicedo

Agradecimientos

Al profesor Darío A. Castañeda Sánchez por haber confiado en mis capacidades y, en conocimiento de las limitaciones, hizo posible la construcción de esta tesis a través de su valiosa asesoría y aportes en mi proceso de formación.

A la profesora Liliana M. Hoyos Carvajal porque en su momento atesó mi andar, fue fundamental en la construcción de este documento a través de su valiosa asesoría, aportes en mi proceso de formación y palabras de ánimo para no desfallecer.

A los profesores: Pablo E. Buriticá Céspedes, Guillermo Correa, Jairo Rueda, Kenneth Cabrera, Enrique Martínez, José Cotes y Andrés Ochoa, por la valiosa asesoría brindada.

A mis amigas (Nancy Grisales, Sonia Benavides, Natalia Ochoa, Ruby Loaiza, Sara Bedoya, Sara Tamayo, Isabel Bastidas, Gloria Castillo, Ángela Arcila, Lumey Pérez y Madeleyne Parra) y amigos (Juan Monsalve, Diego David, Carlos Ramírez, Jonathan Hincapié, Francisco Monsalve, Mauricio Torrenegra y Alfonso Orozco) que siempre estuvieron ahí animándome a no desistir.

A mi madre, padre y hermana.

A Colciencias, programa Jóvenes Investigadores e Innovadores.

Al Centro de Investigaciones del Banano – Cenibanano.

A la Comercializadora Internacional Banacol.

A la finca Punto Fijo.

Resumen

Mycosphaerella fijiensis M. Morelet, agente causal de la Sigatoka negra - SN, es el miembro más destructivo del “complejo Sigatoka”, el cual, es la enfermedad más destructiva en los cultivos de banano y plátano. El objetivo de la investigación, consistió en modelar la severidad de la SN en plantaciones bananeras en la región de Urabá, Antioquia – Colombia, mediante diferentes alternativas estadísticas, a partir de la identificación de la influencia de fenómenos macro y micro climáticos y, espaciales, sobre la epidemiología de la enfermedad. En ese sentido, se generaron modelos de regresión lineal múltiple mediante la metodología Backward Stepwise, para el estado de evolución de la enfermedad en tres fincas colindantes que implementan diferentes prácticas culturales para el manejo de la SN y para 10 fincas que cubren el gradiente latitudinal de precipitación de la región, para la hoja más joven enferma, en función de variables climáticas acumuladas, promediadas, de máxima y de mínima según su naturaleza, y; para una finca ubicada en un área de alta incidencia de la enfermedad, se modeló espacialmente mediante técnicas geoestadísticas, la hoja más joven manchada - HMJM, con el objetivo de determinar su estructura y categoría de dependencia espacial. La capacidad predictiva de los modelos de regresión lineal múltiple varió según la frecuencia de la variable climática empleada, diaria o semanal, además, si se consideró solo el efecto aditivo o la interacción de estas. La HMJM, se describió a partir de modelos gaussianos, los cuales divergen de los modelos reportados en otras investigaciones, en patosistemas similares.

Palabras clave: *Pseudocercospora fijiensis*, *Musa* sp., Cavendish, preaviso biológico, coeficiente de determinación, kriging, Matérn.

Abstract

Black Leaf Streak Disease (BLSD) caused by *Mycosphaerella fijiensis* M. Morelet, is one of the most damaging diseases of bananas and plantains. The aim of the present research was to model the severity of BLSD in banana plantations, based on the response of the pathogen to climatic variables at different spatial scales, using various statistical methods. The study was carried out in the banana growing region of Urabá located at the Caribbean coast of Colombia near the border with Panamá. Two sets of data were used to generate models of the behavior of the disease using Backward Stepwise multiple linear regression. In both cases precipitation, solar radiation, relative humidity, high, low and mean temperature were used as independent variables. The first data set came from three adjacent farms that implemented different cultural practices to manage BLSD, the stage of evolution of the disease was modelled for these. The second data set came from 10 farms that represented a latitudinal rain gradient, increasing southward from 2000 mm to 4000 mm annual rain. For these, the youngest leaf with symptoms (YLWS) variable was modelled. Finally, in order to evaluate the spatial structure and autocorrelation of BLSD, a third data set from a high BLSD incidence area was analyzed using geostatistical techniques, the youngest leaf spotted (YLS) variable was used to build the model. The predictive ability of the models was influenced by the periodicity of the climatic variables employed (daily to weekly), also by the additive vs. interactive effect of these variables. The YLS variable was best described by Gaussian models, which diverge from models reported in other research works in similar pathosystems.

Keywords: *Pseudocercospora fijiensis*, *Musa* sp., Cavendish, biological forecasting system, coefficient of determination, kriging, Matérn.

Contenido

	Pág.
Resumen	IX
Lista de figuras.....	XIII
Lista de tablas	XV
Lista de símbolos y abreviaturas	XVII
Introducción	1
1. La Sigatoka negra en la región bananera de Urabá antioqueño	5
1.1 Importancia del cultivo.....	5
1.2 La enfermedad, su epidemiología e impacto	5
1.3 Epidemiología de la enfermedad en el país.....	8
1.4 Características agroecológicas de la región de estudio	10
2. Predicción del estado de evolución de la Sigatoka negra según época seca o lluviosa	17
2.1 Introducción.....	18
2.2 Materiales y metodología	21
2.2.1 Toma de datos.....	21
2.2.2 Análisis estadístico	23
2.3 Resultados y discusión.....	25
2.3.1 Variables climáticas que explican el estado de evolución de la Sigatoka negra	25
2.3.2 Modelos predictivos para el estado de evolución de la Sigatoka negra.....	32
3. Modelamiento de la severidad de la Sigatoka negra en función de variables climáticas	35
3.1 Introducción.....	36
3.2 Materiales y metodología	38
3.2.1 Toma de datos.....	38
3.2.2 Análisis estadístico	40
3.3 Resultados y discusión.....	41
3.3.1 Variables climáticas que explican la Hoja Más Joven Enferma	41
3.3.2 Modelos predictivos para la Hoja Más Joven Enferma.....	47
4. Modelo espacial para la Sigatoka negra a través de la variable biológica hoja más joven manchada en banano en la región de Urabá.....	55
4.1 Introducción.....	56

4.2	Materiales y metodología	58
4.2.1	Toma de datos	58
4.2.2	Análisis estadístico	58
4.3	Resultados y discusión	60
5.	Integración e instrumentación de los modelos	67
5.1	Introducción	67
5.2	Modelos para el estado de evolución de la enfermedad y hoja más joven enferma	67
5.3	Modelos de variabilidad espacial	69
6.	Conclusiones y recomendaciones	71
6.1	Conclusiones	71
6.2	Recomendaciones	73
A.	Anexo: Dinámica temporal de la hoja más joven enferma y de la precipitación	75
	Bibliografía	87

Lista de figuras

	Pág.
Figura 1-1: Dinámica temporal de la temperatura mínima, media y máxima para las estaciones Tulenapa (recuadro superior) y Uniban (recuadro inferior).	13
Figura 1-2: Dinámica temporal del brillo solar para las estaciones Tulenapa (recuadro superior) y Uniban (recuadro inferior).	14
Figura 1-3: Dinámica temporal de la humedad relativa para las estaciones Tulenapa (recuadro superior) y Uniban (recuadro inferior).	15
Figura 2-1: Representación de la práctica cultural de manejo de la SN en la planta de banano, denominada poda temprana.	22
Figura 2-2: Esquema de la evaluación de la relación entre la variable biológica y las variables climáticas.	24
Figura 2-3: Dinámica temporal del estado de evolución de la enfermedad en tres fincas bananeras ⁽¹⁾ de la región de Urabá, Colombia.	26
Figura 2-4: Precipitación (mm) acumulada en las semanas 22 a 47 de 2006.	27
Figura 3-1: Ubicación de las fincas en la región bananera de Urabá.	39
Figura 3-2: Dinámica temporal de la HMJE y de la precipitación en la región bananera de Urabá antioqueño.	43
Figura 4-1: Malla de muestreo.	59
Figura 4-2: Modelos teóricos ajustados al comportamiento espacial de la Sigatoka negra, evaluada a través de la hoja más joven manchada durante cuatro semanas, año 2005. a. Semana 43: semivariograma omnidireccional, modelo: “Efecto pepita puro”; b. y c. Semana 45 y 46: modelo: Matérn, ángulo de anisotropía: 90°, relación de anisotropía: uno y 1.5, respectivamente; d. Semana 47: modelo: Matérn, ángulo de anisotropía: 0°, relación de anisotropía: dos.	64
Figura 4-3: Mapas predictivos del comportamiento espacial de la Sigatoka negra, evaluada a través de la hoja más joven manchada durante cuatro semanas, año 2005. a. y b. Semana 45 y 46: modelo: Matérn, ángulo de anisotropía: 90°, relación de anisotropía: uno y 1.5, respectivamente, Kappa: 2.5 (modelo gaussiano); c. Semana 47: modelo: Matérn, ángulo de anisotropía: 0°, relación de anisotropía: dos, Kappa: 2.5 (modelo gaussiano).	65
Figura 6-1: Dinámica temporal de la hoja más joven enferma y de la precipitación para la finca A, ubicada al sur de Carepa y norte de Chigorodó.	76
Figura 6-2: Dinámica temporal de la hoja más joven enferma y de la precipitación para la finca G, ubicada al sur de Carepa y norte de Chigorodó.	77

Figura 6-3: Dinámica temporal de la hoja más joven enferma y de la precipitación para la finca B, ubicada al sur de Apartadó y norte de Carepa.	78
Figura 6-4: Dinámica temporal de la hoja más joven enferma y de la precipitación para la finca E, ubicada al sur de Apartadó y norte de Carepa.	79
Figura 6-5: Dinámica temporal de la hoja más joven enferma y de la precipitación para la finca H, ubicada al sur de Apartadó y norte de Carepa.	80
Figura 6-6: Dinámica temporal de la hoja más joven enferma y de la precipitación para la finca C, ubicada al sur de Turbo y norte de Apartadó.....	81
Figura 6-7: Dinámica temporal de la hoja más joven enferma y de la precipitación para la finca D, ubicada al sur de Turbo y norte de Apartadó.....	82
Figura 6-8: Dinámica temporal de la hoja más joven enferma y de la precipitación para la finca F, ubicada al sur de Turbo y norte de Apartadó.....	83
Figura 6-9: Dinámica temporal de la hoja más joven enferma y de la precipitación para la finca I, ubicada al sur de Turbo y norte de Apartadó.	84
Figura 6-10: Dinámica temporal de la hoja más joven enferma y de la precipitación para la finca J, ubicada al sur de Turbo y norte de Apartadó.....	85

Lista de tablas

	Pág.
Tabla 2-1: Intervalos y rezagos de las variables climáticas semanales, con mayores coeficientes de correlación positivos de Pearson (r) respecto a la variable biológica estado de evolución de la enfermedad.	28
Tabla 2-2: Intervalos y rezagos de las variables climáticas semanales, con mayores coeficientes de correlación negativos de Pearson (r) respecto a la variable biológica Estado de Evolución de la Enfermedad.	29
Tabla 2-3: Parámetros de los modelos predictivos (valor $p < 0.05$) del nivel de enfermedad de Sigatoka negra, estado de evolución de la enfermedad, en función del efecto aditivo de las variables climáticas semanales, con el periodo de acumulación o promedio y rezago más relacionados, con esta, para cada una de las fincas, de la región de Urabá, Colombia.	34
Tabla 2-4: Parámetros de los modelos predictivos (valor $p < 0.05$) del nivel de enfermedad de Sigatoka negra, estado de evolución de la enfermedad, en función del efecto interactivo de las variables climáticas semanales, con el periodo de acumulación o promedio y rezago más relacionados, con esta, para cada una de las fincas, de la región de Urabá, Colombia.	34
Tabla 3-1: Intervalos y rezagos de las variables climáticas diarias, con mayores coeficientes de correlación de Pearson (r) respecto a la variable biológica hoja más joven enferma (HMJE).	44
Tabla 3-2: Intervalos y rezagos de las variables climáticas semanales, con mayores coeficientes de correlación de Pearson (r) respecto a la variable biológica Hoja Más Joven Enferma (HMJE).	46
Tabla 3-3: Parámetros de los modelos predictivos (valor $p < 0.001$) del nivel de enfermedad de Sigatoka negra, hoja más joven enferma (HMJE), en función del efecto aditivo de las variables climáticas diarias, con el periodo de acumulación o promedio y rezago más relacionados, con esta, para cada una de las fincas, de la región de Urabá, Colombia.	51
Tabla 3-4: Parámetros de los modelos predictivos (valor $p < 0.001$) del nivel de enfermedad de Sigatoka negra, hoja más joven enferma (HMJE), en función del efecto aditivo e interactivo de las variables climáticas diarias, con el periodo de acumulación o promedio y rezago más relacionados, con esta, para cada una de las fincas, de la región de Urabá, Colombia.	52

Tabla 3-5: Parámetros de los modelos predictivos (valor $p < 0.001$) del nivel de enfermedad de Sigatoka negra, hoja más joven enferma (HMJE), en función del efecto aditivo de las variables climáticas semanales, con el periodo de acumulación o promedio y rezago más relacionados, con esta, para cada una de las fincas, de la región de Urabá, Colombia.....	53
Tabla 3-6: Parámetros de los modelos predictivos (valor $p < 0.001$) del nivel de enfermedad de Sigatoka negra, hoja más joven enferma (HMJE), en función del efecto aditivo e interactivo de las variables climáticas semanales, con el periodo de acumulación o promedio y rezago más relacionados, con esta, para cada una de las fincas, de la región de Urabá, Colombia.	54
Tabla 4-1: Estadísticos resumen del comportamiento de la Sigatoka negra, evaluada a través de la hoja más joven manchada durante cuatro semanas, año 2005.	61
Tabla 4-2: Parámetros de los modelos teóricos ajustados al comportamiento espacial de la Sigatoka negra, evaluada a través de la hoja más joven manchada durante cuatro semanas, año 2005.	63

Lista de símbolos y abreviaturas

Símbolos con letras latinas

<u>Símbolo</u>	<u>Término</u>	<u>Unidad SI</u>	<u>Definición</u>
a	Rango	m	Distancia máxima a la que existe correlación entre parejas de puntos
bh-T	Bosque húmedo tropical		
C ₀	Efecto pepita		Semivarianza atribuida al error de medición y a la variabilidad presentada a una escala menor que la de muestreo
C+C ₀	Meseta		Semivarianza total
C ₂ H ₄	Etileno		
CO ₂	Dióxido de carbono		
E	Tasa transpiratoria foliar	mmoles agua m ⁻² s ⁻¹	
Fn	Tasa fotosintética neta foliar	μmoles CO ₂ m ⁻² s ⁻¹	
r	Coefficiente de correlación de Pearson	1	
R ²	Coefficiente de determinación	1	r ²

Símbolos con letras griegas

<u>Símbolo</u>	<u>Término</u>	<u>Unidad SI</u>	<u>Definición</u>
β ₀	Intercepto		

Subíndices

<u>Subíndice</u>	<u>Término</u>
cv.	Cultivar

Abreviaturas

Abreviatura Término

EE	Estado de evolución de la enfermedad
ECM	Error cuadrado medio de predicción
FIC	Frente de Convergencia Intertropical
HMJE	Hoja Más Joven Enferma
HMJM	Hoja Más Joven Manchada
HR	Humedad Relativa
PI	Período de incubación
PLA	Período de latencia asexual
PLS	Período de latencia sexual
PPI	Promedio Ponderado de Infección
SA	Sigatoka amarilla
SN	Sigatoka negra

Introducción

El objetivo de la investigación consistió en modelar la severidad de la Sigatoka negra – SN (*Mycosphaerella fijiensis* M. Morelet) en plantaciones bananeras (*Musa* sp. AAA, subgrupo Cavendish) en la región de Urabá, mediante diferentes alternativas estadísticas, a partir de la identificación de la influencia de fenómenos macro y micro climáticos según la ubicación espacial de las plantaciones, sobre la epidemiología de la SN para la región de Urabá, Antioquia – Colombia, con miras a incrementar el conocimiento que se tiene de la enfermedad en la región y contribuir en la apropiación de metodologías que convertidas a herramientas disminuirían el impacto de las estrategias de control actual. Estas, en la región de Urabá, se fundamentan en el manejo químico calendario de fincas agrupadas en bloques de fumigación aérea, complementadas en algunas fincas, con un manejo cultural, el cual consiste en la eliminación del área foliar necrosada (grados cinco a seis según se la escala propuesta por Fouré (1985)). Las empresas que realizan las aspersiones aéreas, de los productos químicos usados para el control de la SN, a través de inspectores de campo, realizan seguimiento en las fincas del estado de la enfermedad a través de las hojas más joven con síntomas (estadios uno a tres) y manchada (estadios cuatro a seis). Sin embargo, este indicador, pareciera estar más enfocado al diagnóstico general de la enfermedad en el bloque, que a una herramienta de manejo diferencial y no calendario, ya que, las fincas de estos bloques siempre se asperjan con la misma frecuencia e intensidad. En ese sentido, se requieren de estrategias, que contribuyan a una definición, de los bloques con base en la distribución de la incidencia regional y presión temporal de la enfermedad y no a intereses de tipo económico, ya que a largo plazo, como viene ocurriendo en la región, con este tipo de manejo, se viene perdiendo efectividad para la mayoría de productos, incrementando el número de ciclos para lograr una efectividad adecuada, con las ya conocidas consecuencias ambientales y para la salud humana. Si las empresas de fumigación invierten recursos considerables en la captura de esta información, es necesario desde la academia desarrollar estrategias epidemiológicas complementarias, que si bien, se vienen implementando en otros países y cultivos, son novedosas para la región de Urabá, ya que permitirían a los departamentos de Sanidad

Vegetal del sector, anticiparse sobre el comportamiento temporal que tendrá la enfermedad en función de la oferta ambiental y regional en función de la interacción de factores, ambientales y de suelo y manejo agronómico del cultivo.

El trabajo comprende cinco capítulos. En el primer capítulo se presenta una contextualización sobre la importancia del cultivo; la enfermedad, su epidemiología e impacto; el conocimiento sobre la epidemiología de la enfermedad desarrollado en el país, y; las características agroecológicas de la región bananera de Urabá, Colombia. En el segundo y tercer capítulo, se construyen modelos de regresión lineal múltiple mediante la metodología Backward Stepwise para el estado de evolución de la enfermedad y la hoja más joven enferma, respectivamente, en función del mejor período de acumulación o promediado, de máximo o mínimo y rezago de las variables climáticas según su naturaleza, considerando tanto, el efecto aditivo de las variables climáticas, como con la interacción de estas. En el cuarto capítulo, se modela espacialmente la hoja más joven manchada a partir de modelos teóricos pertenecientes a la familia Matérn y, en el quinto capítulo, se discute la integración de los modelos anteriormente desarrollados.

Finalmente, la epidemiología, dentro de las diversas áreas de la fitopatología, es la que posee un mayor potencial para el uso de modelos, porque esta ciencia es responsable de la descripción de las enfermedades a nivel de poblaciones y comunidades (Costa *et al*, 2002). Así, el desarrollo de modelos epidemiológicos, permiten describir, explicar y pronosticar la evolución de la SN para la región de Urabá, acorde a las zonas de incidencia y de época seca o lluviosa, los cuales son de gran importancia en los programas de manejo integral, puesto que permiten, mediante el pronóstico temprano de la enfermedad, reducir la frecuencia de aplicación de fungicidas.

Objetivo general

Generar modelos descriptivos y predictivos para la Sigatoka negra (*Mycosphaerella fijiensis* M. Morelet) en banano para la región de Urabá, Antioquia – Colombia.

Objetivos específicos

Desarrollar y validar modelos predictivos para el estado de evolución de la Sigatoka negra en banano en la región de Urabá según época seca o lluviosa.

Desarrollar y validar modelos predictivos para la severidad de la Sigatoka negra a través de la variable biológica hoja más joven enferma en banano para la región de Urabá en función de variables climáticas.

Desarrollar, validar e implementar un modelo espacial para la Sigatoka negra a través de la variable biológica hoja más joven manchada en banano en la región de Urabá.

1. La Sigatoka negra en la región bananera de Urabá antioqueño

1.1 Importancia del cultivo

Las musáceas se encuentran cultivadas en más de 100 países a lo largo de las regiones tropicales y subtropicales (Marín *et al*, 2003); son el cuarto cultivo alimenticio más importante después del arroz, el trigo y el maíz (Churchill, 2011) y, además, según Aguirre *et al* (2012) el banano, es uno de los productos más importantes a nivel frutícola, ya que aproximadamente el 20% de la producción se destina al comercio internacional, junto con manzanas, uvas y cítricos.

A nivel mundial, Colombia ocupó el décimo cuarto puesto en producción de banano después de México. La India, China y Filipinas se ubicaron en los tres primeros lugares de producción (FAO, 2016). En el año 2015, de las exportaciones agropecuarias colombianas, las ventas de banano representaron el 12%, además, el volumen de estas ascendió a 94.1 millones de cajas de 18.14 kg por valor de \$836.679 millones de dólares, resultantes de 47,407 ha sembradas, de las cuales, 34,267 ha corresponden a la zona bananera de Urabá (Antioquia) y, 13,140 ha establecidas entre los departamentos del Magdalena y de la Guajira (AUGURA, 2016).

1.2 La enfermedad, su epidemiología e impacto

El Ascomycete *Mycosphaerella fijiensis* M. Morelet (anamorfo *Pseudocercospora fijiensis* (M. Morelet) Deighton), originario del Sudeste Asiático (Carlier, 2004), es un hongo haploide en su estado asexual, heterotálico, hemibiotrofo, perteneciente a la clase Dothideomycetes, orden Capnodiales, familia Mycosphaerellaceae, el cual ataca a *Musa*

spp. (Zingiberales: Musaceae) (Churchill, 2011), y a la planta ornamental *Heliconia psittacorum* (Zingiberales: Heliconiaceae) (Gasparotto *et al*, 2005).

Según Churchill (2011) y Carlier *et al* (2002) *M. fijiensis* agente causal de la Sigatoka negra (SN), es considerado el miembro más destructivo del “complejo Sigatoka”, el cual incluye a *M. musicola* Leach (anamorfo *P. musae*), agente causal de la Sigatoka amarilla (SA) y a *M. eumusae* (anamorfo *P. eumusae*), agente causal de la mancha foliar eumusae (conocida anteriormente como la mancha foliar Septoria). La SN es la patología más destructiva en los cultivos de banano y plátano, puesto que ataca las hojas produciendo un rápido deterioro del área foliar, disminuyendo la capacidad fotosintética de la planta y, reduciendo, además, la calidad y la cantidad de la fruta, por la inducción prematura de la maduración de los racimos (Bornacelly, 2009; Churchill, 2011; Patiño, 2000). Asimismo, aumentan los riesgos ambientales y de salud de los trabajadores, debido al control químico obligado en las explotaciones comerciales de banano (Churchill, 2011).

La SN tiene además implicaciones fisiológicas, las cuales han sido documentadas por Hidalgo *et al* (2006) quienes en bananos de la cv. Valery bajo condiciones controladas de temperatura, riego y humedad, hallaron que la tasa fotosintética neta foliar (F_n ; $\mu\text{moles de CO}_2$ reducidos por $\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$) decayó con el incremento del porcentaje de severidad ($F_n = -0.1517X + 6.845$; $R^2 = 0.72$) y el estadio de la enfermedad ($F_n = -1.62X + 8.36$; $R^2 = 0.60$), mientras que el impacto del patógeno sobre la tasa transpiratoria foliar (E ; $\text{mmoles de agua m}^{-2}\text{s}^{-1}$) fue relativamente menor ($E = -0.0122X + 2.429$; $R^2 = 0.11$), y; Rodríguez-Gaviria y Cayón (2008) quienes observaron una disminución de la tasa fotosintética cercana al 30% en hojas en grado cuatro de severidad según la escala de Stover modificada por Gauhl.

La vida media de los frutos también es afectada por esta enfermedad, Castelan *et al* (2012) en el sudeste de Brasil, reportaron en bananos Cavendish cv. Nanição cosechados en parcelas con alta severidad de SN y SA, una mayor producción de CO_2 y C_2H_4 durante la fase climatérica en comparación con bananos cosechados a una misma edad fisiológica en parcelas con baja severidad de SN y SA, así como una reducción de la vida verde de la fruta a la mitad del tiempo, con un menor peso (40%). Resultados similares encontraron Chillet *et al* (2009) en Guadalupe (Francia), quienes reportaron para bananos Cavendish cv. Gran Enano cosechados en parcelas comerciales con alta severidad de SA, menor vida verde de la fruta (17.3 días) y cuando no se controló la enfermedad, 6.1 días, en

comparación con, bananos cosechados a una misma edad fisiológica en parcelas comerciales con baja severidad de SA (28 días).

En cuanto al manejo de la enfermedad, Smith *et al* (1997), Rey y Mira (2010) y Torres *et al* (2012) afirman que es difícil y costosa de controlar, además, documentan que el método de manejo se basa en prácticas de manejo cultural y en la aplicación aérea de fungicidas, sin embargo, estos últimos pueden seleccionar poblaciones insensibles del microorganismo a los ingredientes activos de tipo sistémico empleados. A nivel genético, la mayoría de los cultivares son estériles, lo que imposibilita su uso para la obtención de híbridos resistentes a la SN (Churchill, 2011). Por lo tanto, el uso de fungicidas para la protección contra la enfermedad ha recibido una atención importante, porque en áreas con una adecuada pluviometría para la producción bananera de clones susceptibles, las medidas no químicas usualmente no permiten alcanzar un control satisfactorio de esta (Pérez, 2006). Así, el manejo de SN en el año de 1999 representó un valor cercano al 30% de los costos de producción del cultivo (Romero *et al*, 1999), del 20% en el 2010 (Rey y Mira, 2010) y, de aproximadamente el 40% en años posteriores con hasta 40 aplicaciones por ciclo según Torres *et al* (2012). Además, Kema (2006) afirmó que en plantaciones debidamente establecidas y con el manejo adecuado, más del 30% de los costos de producción están destinados al control de la enfermedad, por lo que se asume un rango entre el 20 y 40% del total de los costos de producción, para el control esta.

Finalmente, se ha reportado un amplio rango de factores que afectan Sigatoka, por ejemplo, la sombra, el tipo de suelo, el drenaje, el uso de fertilizantes, la densidad de plantas y el riego (Meredith citado por Smith *et al*, 1997). Así, la nutrición mineral de las plantas, considerada como un factor exógeno, puede modificarse y constituye un punto fundamental adicional para enfrentar las enfermedades (Aguirre *et al*, 2012). Por ejemplo, Uchôa *et al* (2011) encontraron una relación inversa entre la severidad de la SN con el contenido edáfico de potasio y de fósforo y, positiva con el de azufre. Resultados similares encontraron Aguirre *et al* (2015) entre el porcentaje promedio de infección con el contenido foliar de potasio.

1.3 Epidemiología de la enfermedad en el país

La SN fue descrita por primera vez en Fiyi en 1963 (Marín *et al*, 2003) y llegó a América Central en Honduras en el año de 1972, desde donde se diseminó por la región (Aguirre *et al*, 2012). En Colombia, esta enfermedad es reportada en el mes de octubre de 1981, en la región bananera de Urabá (Antioquia) y seis años más tarde (1987), se identifica en la zona bananera de Santa Marta (Magdalena), en el distrito de Sevilla; desde su observación en Urabá, se ha diseminado por la regiones Atlántica y Pacífica a través de los valles aluviales y hacia la zona central del país por el valle del río Magdalena (Romero *et al*, 1999; Patiño, 2000).

Romero *et al* (1999) mediante la amplificación por PCR de 45 cepas de *Mycosphaerella* provenientes de diferentes zonas bananeras y plataneras de Colombia, con cebadores específicos para *M. fijiensis* y *M. musicola*, encontraron que *M. fijiensis* se distribuyó desde los 200 hasta los 2000 m de altitud, mientras que *M. musicola* sólo fue detectada en un aislamiento a 2000 m de altitud en el municipio de Donmatías (Antioquia), resaltando el avance de la SN hacia las zonas plataneras del país y la característica de ser más agresiva que la SA, sin embargo, Marín *et al* (2003) aseveran que la prevalencia de una especie sobre otra se encuentra en función de la temperatura. Carlier *et al* (2000) y Carlier (2004) coinciden en afirmar que la SN se está desplazando a nuevas áreas productivas reemplazando la SA.

En cuanto a su epidemiología, Bornacelly (2009) en el sector La Aguja, municipio de Zona Bananera (Magdalena), encontró que el ciclo de vida del patógeno es más largo en la época seca que en la lluviosa, puesto que los síntomas, período de incubación (PI), los observó 20.82 y 11.71 días después de la inoculación, respectivamente y, la formación de conidias, período de latencia a formación de conidias (ciclo asexual) – PLA, a los 27.10 días en la época seca y a los 17.05 días en la época húmeda. Mayorga (1990) para *Musa* sp. AAA subgrupo Cavendish, cv Giant Cavendish, en la región de Urabá, determinó según las épocas seca o húmeda la duración del PI, en 26 y 18 días, respectivamente, del PLA, en 37 y 26 días, respectivamente, y de latencia a formación de ascosporas (ciclo sexual) – PLS, en 84 y 49 días, respectivamente.

Bajo la observación de que el número de ciclos de aplicación de fungicidas para el control de la enfermedad de la SN no son homogéneos para la región bananera de Urabá, Hoyos *et al* (2006) a partir del ciclo de vida del patógeno, identificaron tres zonas de incidencia diferencial de la enfermedad: zona norte, circunscrita a franjas productoras en los municipios de Turbo y Apartadó, zona centro que cubre parte del municipio de Apartadó y Carepa, y zona sur, que comprende cultivos en el municipio de Chigorodó y parte de Carepa, lo que les permitió concluir que la duración del ciclo de vida está determinado principalmente por condiciones climáticas como precipitación, dado que entre la zona norte y la zona sur existen hasta 1000 mm de precipitación anual de diferencia (2000 a 3000 mm respectivamente). Martínez *et al* (2010) y Ochoa *et al* (2012) obtuvieron resultados contrastantes para la región de Urabá respecto a lo hallado por Hoyos *et al* (2006) y Mayorga (1990), pues mediante el método de preaviso biológico (Fouré y Ganry, 2008), encontraron que la enfermedad tiene mayor impacto (mayor valor unitario del estado de evolución de la enfermedad - EE) en la plantación durante la fase cálida del fenómeno ENSO (El Niño), menor impacto durante la fase fría (La Niña), y un impacto intermedio durante la fase normal, explicando los resultados obtenidos bajo la tesis de que durante los períodos húmedos la tasa de emisión foliar excede la tasa de los períodos secos. En la literatura, producto del déficit hídrico, Pérez-Vicente *et al* (2000) documentaron que debido a problemas de riego presentados durante el período 1992-1993 que determinó una menor tasa de emisión de hojas, el valor de la hoja más joven manchada (HMJM) disminuyó, situación análoga a la reportada por Martínez *et al* (2010). Además, Rivera (2004), halló en plátano cv. Hartón, que la lluvia acumulada redujo el PLA, pero al exceder los 300 mm el PLA se alargó, observación que puede explicar también lo encontrado por Martínez *et al* (2010), puesto que durante La Niña la precipitación suele ser mayor en comparación con El Niño.

Finalmente, Bornacelly (2009) para la zona bananera del Magdalena, describió el crecimiento constante en los niveles de severidad y agresividad con que la SN afectó los cultivos, situación que se evidenció en el incremento del número de aspersiones con fungicidas, las cuales pasaron de 13 ciclos en el año 1992 a 27 en el año 2008, con un fuerte impacto negativo para la economía de la región. Patiño (2000) quien describió también el anterior fenómeno tanto para la zona bananera de Urabá como del Magdalena, afirmó que la tendencia del incremento en el número de ciclos puede ser consecuencia del aumento en agresividad del patógeno debido a causas genéticas o ambientales, a un

inadecuado manejo cultural de la enfermedad y/o, a pérdidas de sensibilidad del hongo a los fungicidas. Un posible caso de pérdida de sensibilidad del hongo a los fungicidas es presentado por Bornacelly (2009), quien no encontró diferencias significativas en el tiempo de aparición de la mayoría de los estadios de la enfermedad comparando plantas expuestas a la aplicación de fungicidas para el control de la SN contra plantas que no estuvieron expuestas a la aplicación de estos. Así, la pérdida de sensibilidad ha traído como consecuencia un mayor número de tratamientos, incrementos de los costos de producción y mayor contaminación del medio ambiente por la mayor cantidad de protectante utilizada (Pérez, 2006).

1.4 Características agroecológicas de la región de estudio

El clima de Colombia exhibe alta variabilidad temporal a diferentes escalas, que abarcan desde las horas y el ciclo diurno hasta escalas interanuales como la del fenómeno ENSO (El Niño/La Niña) (Martínez *et al*, 2010). En términos generales, se puede decir que para Colombia el fenómeno del Niño está asociado con menor precipitación pluvial y temperaturas más altas de lo normal, mientras que el de la Niña se asocia con más lluvia (excepto en los trimestres febrero – abril a abril – junio, en los que la precipitación es escasa) y temperaturas por debajo de los valores normales (Rey, 2012).

Para la región bananera de Urabá, Guarín (2011) encontró aumentos de hasta el 30% respecto a un año normal de la precipitación durante la ocurrencia de la Niña y disminuciones de hasta un 39% respecto a la media anual durante la ocurrencia del Niño, siendo mayores al sur y al occidente del eje bananero.

La industria bananera está concentrada en el denominado eje bananero que inicia al oriente del municipio de Chigorodó, cubre los municipios de Carepa, Apartadó y Turbo, limita al norte con el río Guadualito en el corregimiento El Tres, al sur con la Comunal Santillana, al oriente con el piedemonte de la serranía de Abibe y al occidente con el río León y el golfo de Urabá.

El Urabá antioqueño se encuentra localizado en el extremo sur de la costa Caribe Colombiana. Desde el punto de vista regional, Urabá está localizado en el límite septentrional de la faja de fluctuaciones anual del llamado Frente Intertropical de Convergencia (FIC). La fluctuación de dicho frente, es uno de los factores determinantes de la variación climática que ocurre en distintos períodos de un año. La influencia del FIC depende de su posición hacia el norte o hacia el sur, de tal suerte que, en los meses de enero, febrero y marzo, cuando la zona de convergencia alcanza su posición más meridional (cercana a los 5° de latitud sur), la región se ve sometida al régimen de altas presiones, con vientos superficiales provenientes del norte que atraviesan la región en sentido noroeste y con velocidades superiores a los 15 kmh⁻¹, produciéndose un período de menor cantidad relativa de lluvias. En sentido contrario, cuando la zona de convergencia alcanza su posición más septentrional, la región es sometida a la influencia de masas húmedas que se desplazan en sentido sur sureste, provenientes del océano Pacífico que originan las lluvias más frecuentes en el período que va de mayo a noviembre (Salazar, 2012). Sin embargo, según Guarín (2011) la región bananera de Urabá, se caracteriza por un comportamiento sostenido de precipitación moderada entre los meses de abril a diciembre y un fuerte verano en los tres primeros meses del año.

La región, presenta en su mayoría un relieve plano a ligeramente plano, con algunas inclusiones de relieve ligero y moderadamente escarpado; se distribuye en climas cálido seco, con una precipitación media entre 1900 y 2100 mm; cálido húmedo, con precipitaciones entre 2300 y 3000 mm y; cálido muy húmedo, con precipitación anual entre 3000 y 4200 mm (IGAC, 2007). Debido a que la divisoria de aguas hacia el océano Pacífico es de serranías de baja altura (Baudó y Los Saltos), y la región es morfológicamente estructurada por un valle anegadizo, las masas húmedas provenientes del océano Pacífico chocan contra la cordillera Occidental (serranía de Abibe). Por esta razón es que se encuentran precipitaciones superiores a 4000 mm anuales hacia la zona de Mutatá y hacia las cumbres orientales de la serranía, siendo mucho mayor la precipitación en la zona de Chigorodó que en la de Turbo (Salazar, 2012).

La temperatura del aire en Urabá presenta un comportamiento muy regular a lo largo del año, con variaciones inferiores a 1°C, entre los meses fríos y los cálidos (Guarín, 2011) (Figura 1-1), según el IGAC (2007) las temperaturas promedio anual son de 28°C. Se caracteriza, además, por ser de alta nubosidad, lo que afecta el número de horas sol

(Figura 1-2), humedad relativa cercana al 100% en la madrugada, e igualmente alta temperatura (Salazar, 2012). Los meses de mayor humedad son los pertenecientes al núcleo del período lluvioso (Figura 1-3). En mayo y junio la humedad relativa alcanza su punto máximo. Los mínimos son del orden del 62% que se presentan normalmente al medio día. Con frecuencia, las condiciones de saturación se alcanzan en las primeras horas de la mañana. La mayor parte del año se presentan días nublados o parcialmente cubiertos (Roldan, 2008).

Las condiciones ambientales y los efectos de estos fenómenos se revelan en diversos aspectos, como la incidencia de enfermedades o el rendimiento de los cultivos (Patiño, 2000; Rey, 2012). Por ejemplo, Guarín (2011) encontró correlación entre la producción mensual de la zona bananera de Urabá (Cajas exportadas / ha) con los índices del ENSO con rezagos de cinco y seis meses. Según el autor, esto muestra el efecto del ENSO, primero sobre la precipitación, la humedad del suelo entre otras variables que posteriormente afectan la magnitud de la producción bananera.

Figura 1-1: Dinámica temporal de la temperatura mínima, media y máxima para las estaciones Tulenapa (recuadro superior) y Uniban (recuadro inferior).

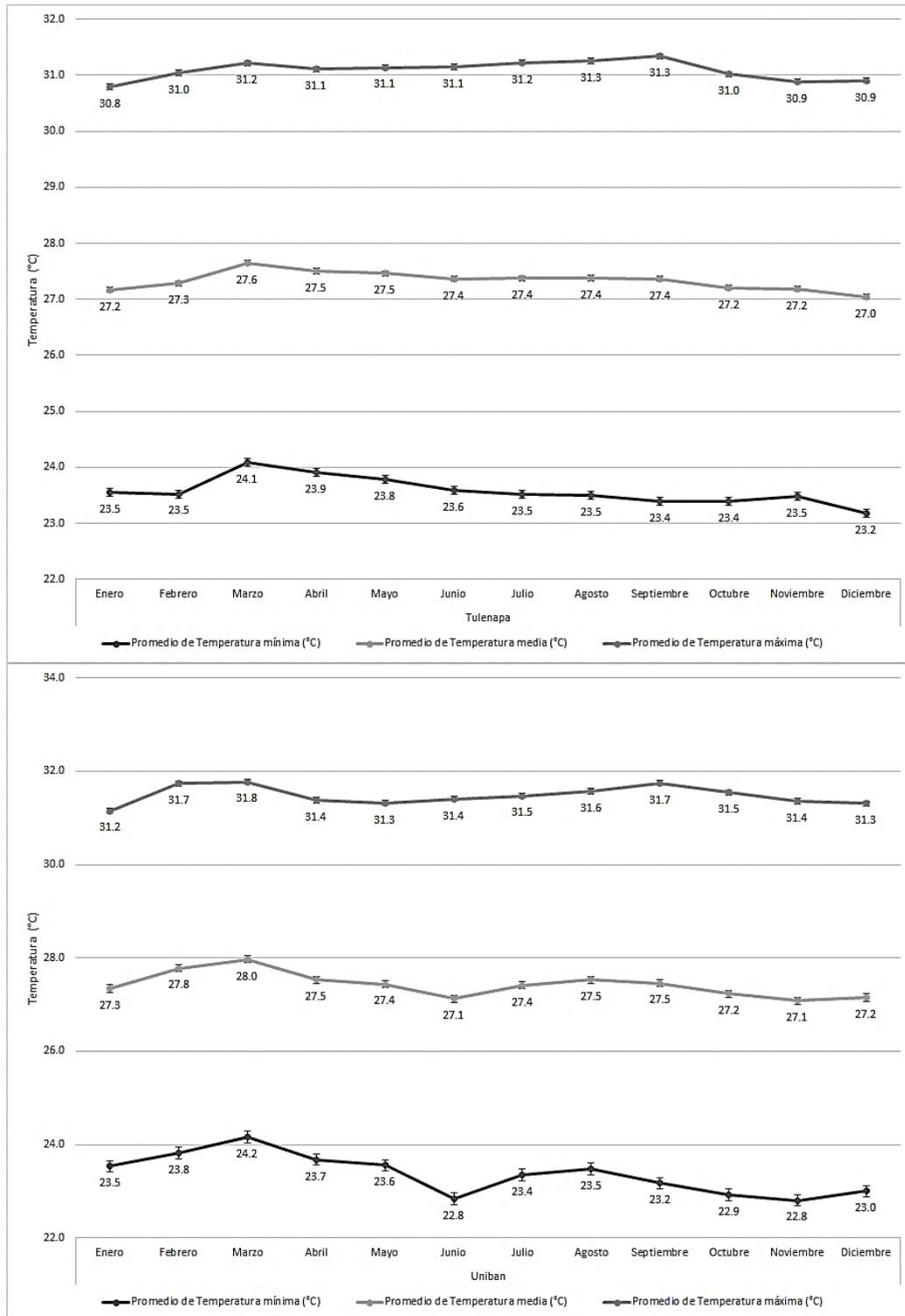


Figura 1-2: Dinámica temporal del brillo solar para las estaciones Tulenapa (recuadro superior) y Uniban (recuadro inferior).

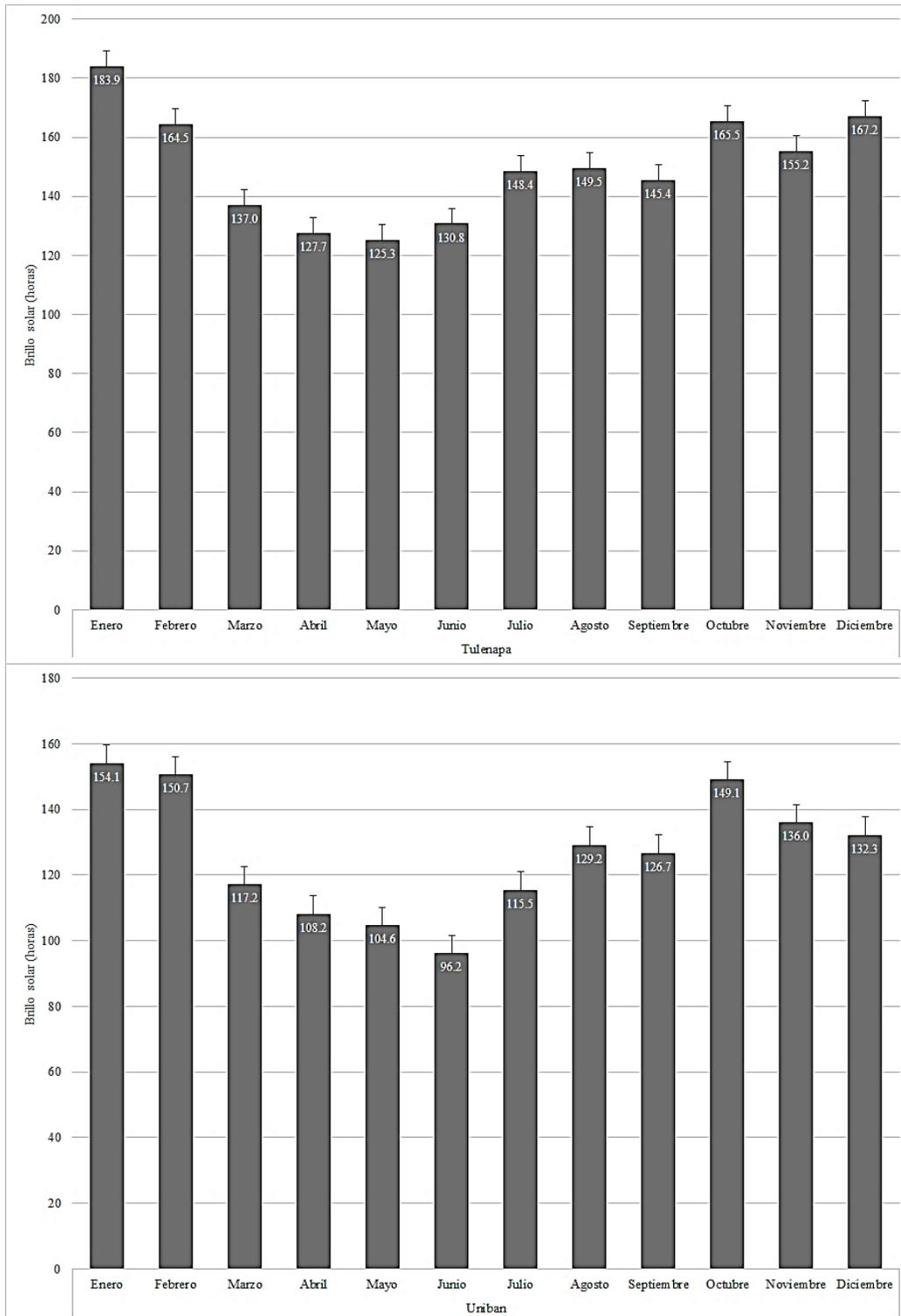
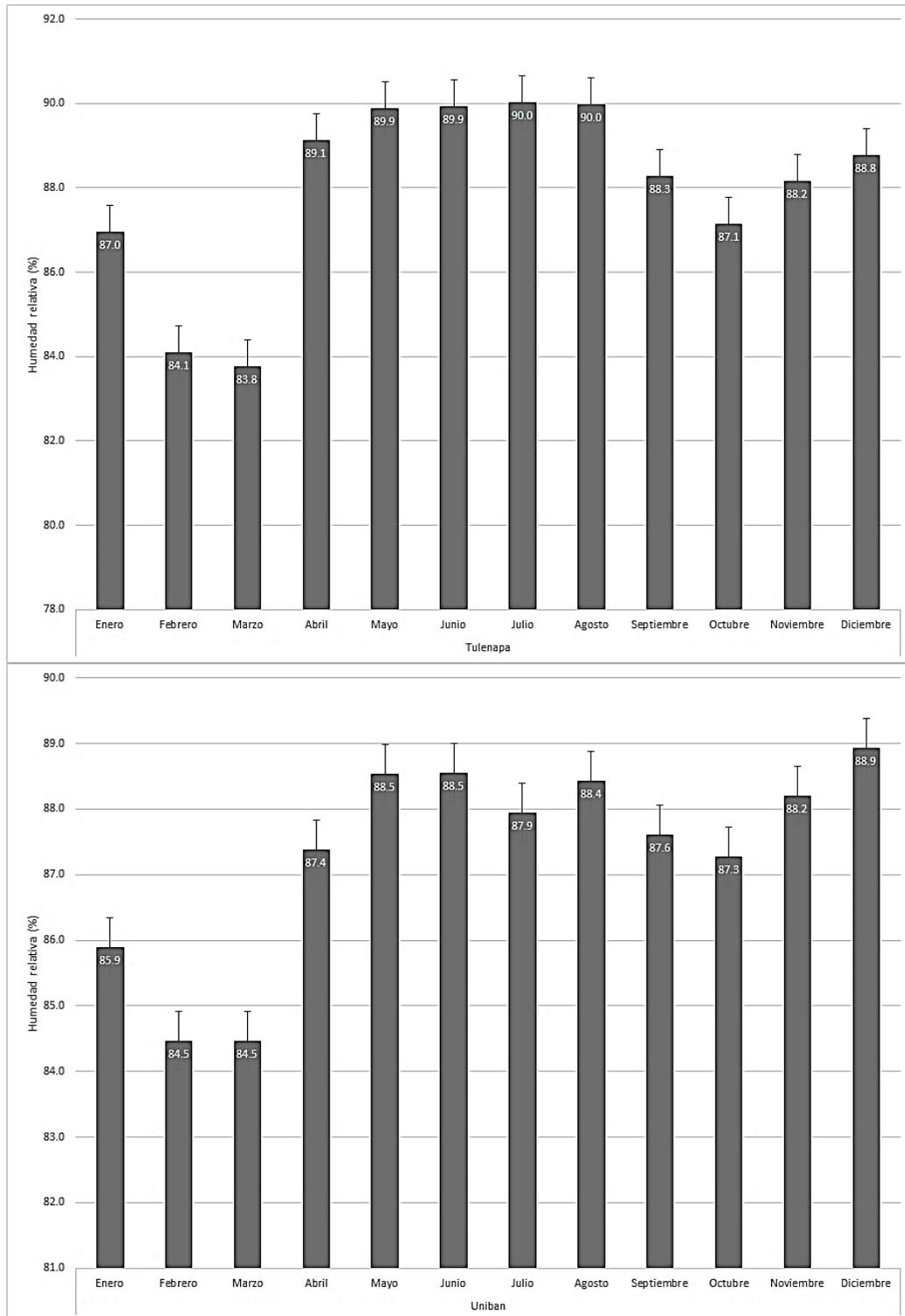


Figura 1-3: Dinámica temporal de la humedad relativa para las estaciones Tulenapa (recuadro superior) y Uniban (recuadro inferior).



2. Predicción del estado de evolución de la Sigatoka negra según época seca o lluviosa

Resumen

El objetivo del presente trabajo fue el de predecir el estado de evolución de la Sigatoka negra – SN en las fincas según registros climáticos. En ese sentido, para tres fincas bananeras colindantes de la región de Urabá, bajo la misma estrategia de manejo químico, pero con diferencias en el manejo cultural de la enfermedad, se generaron modelos de regresión lineal múltiple mediante la metodología Backward Stepwise, para el estado de evolución de la enfermedad - EE, como variable biológica indicadora en función de variables climáticas acumuladas, promediadas, de máxima y de mínima con frecuencia semanal, como factores explicativos. En cada finca, el EE, se evaluó desde la semana 22 hasta la semana 47 de 2006; la precipitación, se registró semanalmente desde la primera semana hasta la semana 47 de 2006 y; para la temperatura mínima y máxima, humedad relativa y brillo solar, se obtuvieron valores diarios durante el mismo período a partir de una estación cercana a las fincas. El modelo con mayor capacidad predictiva, $R^2 = 0.95$ y, menor error cuadrado medio de predicción, $ECM = 117 \pm 46.5$, se obtuvo para la finca A en la que se implementó la práctica cultural de manejo de la enfermedad denominada poda temprana, cuando solo se consideró el efecto aditivo de las variables climáticas, para las otras dos fincas, el error cuadrado medio de predicción fue mayor, finca B: $R^2 = 0.71$, $ECM = 559 \pm 300$ y, finca C: $R^2 = 0.97$, $ECM = 745 \pm 278$. La temperatura media, la humedad relativa mínima y promedia y, el brillo solar máximo, fueron consistentes, en los modelos ajustados para todas las fincas cuando solo se consideró el efecto aditivo de las variables climáticas y, la temperatura media en interacción con el brillo solar mínimo, cuando solo se consideró el efecto de la interacción de estas.

Palabras clave: *Pseudocercospora fijiensis*, *Musa* sp., preaviso biológico, coeficiente de determinación.

2.1 Introducción

La Sigatoka negra presenta una dinámica estacional, la cual produce fuertes afectaciones durante la época lluviosa que coincide con elevadas temperaturas y un menor impacto durante la época seca y fría. Así, los patrones de temperatura y humedad (número de horas que la superficie de la hoja permanece húmeda), y los de evolución de la enfermedad, plantean la existencia de una estrecha relación entre los factores climáticos como la humedad relativa, la temperatura y la precipitación con el patógeno, los cuales condicionan la incidencia y severidad de la enfermedad (Aguirre *et al*, 2012).

El hongo es heterotálico, por lo que, durante los periodos lluviosos se favorece la fertilización de los ascocarpos por los espermacios producidos en los espermogonios, dando lugar al desarrollo y maduración de los pseudotecios, las ascas y ascosporas (Brun, 1963; Stover, 1968). Los pseudotecios y espermogonios se forman en las manchas en estado cinco y seis y masivamente en los tejidos más densamente afectados, durante la época lluviosa con temperaturas superiores a los 20°C (Stover, 1965; Stover, 1968).

Las ascosporas son liberadas a partir del humedecimiento de los tejidos de las hojas portadoras de manchas con pseudotecios maduros. La liberación de las ascosporas comienza a partir de 10 minutos del humedecimiento de los tejidos foliares y concluye alrededor de 60 minutos después (Brun, 1963). Las ascosporas liberadas quedan a merced de las corrientes de aire laterales, que las transportan a grandes distancias y corrientes ascendentes que las transportan a las hojas superiores más jóvenes. Las ascosporas producidas en los tejidos densamente infectados durante los períodos más húmedos, son la principal vía de transmisión de la infección entre áreas distantes entre sí. El transporte ascendente y lateral de las ascosporas hacia la hoja enrollada o cigarro, causa una distribución más o menos uniforme de las lesiones en el extremo apical del limbo de las hojas. Cuando la cantidad de inóculo ascospórico es alto, la distribución de las lesiones puede ser más o menos uniforme en el limbo de las hojas. Sin embargo, la deposición en la hoja que emerge, determina que los primeros síntomas que se hacen visibles sean generalmente los del ápice del semilimbo expuesto a la emergencia de la hoja enrollada (Mourichon y Zapater, 1990).

Las ascosporas germinan en presencia de una lámina de agua a temperaturas en el rango entre 10 y 38°C y óptimamente a 27°C (Pérez y Mauri, 1992). Según los autores, después de la germinación los tubos germinativos crecen sobre la superficie de las láminas foliares durante 72 horas antes de penetrar por los estomas. En temperaturas por debajo de 20°C, la velocidad del crecimiento de los tubos germinativos se deprime fuertemente y es aproximadamente la mitad de la velocidad relativa de los tubos de las ascosporas de *M. musicola* (Ganry, 1978, 1979).

La velocidad de evolución de la enfermedad depende de diferentes factores bióticos y abióticos. La duración de la incubación es afectada fuertemente por la intensidad del inóculo, la temperatura del aire y la duración de las horas con rocío y la lluvia. La temperatura del aire tiene una influencia marcada en la duración del periodo de incubación y de evolución de las lesiones. Así, la ecuación de la ley de acción de la temperatura sobre el crecimiento de los tubos germinativos de *M. fijiensis* fue obtenida por ajuste polinomial, para el cálculo de las constantes de velocidad de crecimiento (V_f) correspondiente a cada temperatura $V_f = 79.35e^{-0.015}(X - 27.32)^2$ ($R^2 = 0.91$) (Porras y Pérez, 1993), para determinar las sumas de velocidades semanales según el método termofisiológico de Livingstone (Ganry, 1978, 1979). Por lo que, cuando las sumas semanales de velocidades de evolución según el método termofisiológico de Livingstone (Ganry, 1978), en función de la ley de acción de la temperatura sobre el crecimiento de los tubos germinativos de las ascosporas, cae por debajo de 1200 unidades para *M. musicola* y 1100 unidades para *M. fijiensis*, la evolución de Sigatoka prácticamente se detiene y en el caso de SN cuatro a seis semanas posteriores pueden ser suspendidos los tratamientos (Pérez, 1980). Sobre la base de los datos diarios de tres años en cinco estaciones meteorológicas de Cuba, se determinó una ecuación para el cálculo de la suma de velocidades de evolución para *M. musicola*, en función de la temperatura máxima y mínima diaria ($SV = 48.14T_{min} - 38.4T_{max} + 2074.45$) y para *M. fijiensis* ($SV = 7.18T_{max} + 79.16 T_{min}$) que permite el cálculo con gran precisión ($R^2 = 0.99$) de la suma de velocidades de evolución, en función de la T_{max} y T_{min} diaria (Porras y Pérez, 1993).

En evaluaciones sobre plantas del clon Gran enano, la aparición de los primeros síntomas después de la infección ocurre en un período de 14 - 15 días (Stover, 1980; Fouré y Mouliom, 1988). La duración de la incubación y de la transición de rayas a necrosis varía

en función de la temperatura y la susceptibilidad de los clones. Los conidios se desarrollan a partir del estado dos de la evolución de los síntomas y posteriormente, en los estados cuatro y cinco de evolución de las manchas. La producción de conidióforos es de corta duración, pues las cámaras estomáticas se utilizan para una rápida producción de pseudotecios y espermogonios. Los conidios se forman en presencia de una lámina de agua, bajo condiciones de muy alta humedad relativa, cercana a la saturación y se dispersan rápidamente por el viento (Stover, 1980).

La velocidad de evolución de la enfermedad y la severidad de los ataques pueden ser estimadas mediante diferentes parámetros. Para la severidad Stover (1971) desarrollo una escala de evaluación de seis grados que posteriormente fue modificada por diferentes investigadores (Stover, 1971; Gauhl, 1994). Guzmán (2003) relata que: *“El sistema de preaviso biológico se implementó y adaptó a finales de los 80's e inicios de los 90's en diferentes países de América Latina y con el se logró reducir significativamente el número de aplicaciones de fungicidas. Posteriormente, por varias razones, incluyendo la resistencia a fungicidas, el sistema perdió vigencia.”* Fouré y Ganry (2008) en seis pasos, desarrollaron nuevamente la metodología, preaviso biológico, para calcular el estado de evolución de la enfermedad - EE, con la cual, según los autores, es posible monitorear el desarrollo de SN con el objetivo de controlar la enfermedad con un mínimo de aplicaciones de fungicidas, a partir de la detección temprana de nuevos ataques. Así, Rey y Mira (2010) documentan la reducción en cuatro ciclos de fungicidas sistémicos y siete protectantes entre el año 2009 y el año 2008 y, resaltan que, al comparar el número de ciclos respecto a un vecino que realiza manejo convencional de la SN, este, aplicó 11 ciclos más de fungicidas sistémicos y cuatro menos de protectantes, para un total de 31 ciclos aplicados por el vecino y 24 por los autores. Finalmente, Guzmán (2003) asevera que: *“El carácter permanente de las plantaciones de banano y plátano, el continuo crecimiento de las plantas o sus retoños y las condiciones climáticas cambiantes, características de las zonas de producción de bananos y plátanos, permiten el establecimiento de sistemas de preaviso.”* Por lo que, el objetivo de este trabajo consistió en desarrollar y validar modelos predictivos para la severidad de la SN a través de la variable biológica EE en banano para la región de Urabá en función de variables climáticas. Dichos modelos fueron específicos según las prácticas agronómicas de cada una de las fincas, lo que conllevó a desarrollar para cada una su propio modelo de predicción.

2.2 Materiales y metodología

La evaluación de la variable biológica, EE, se realizó en el marco de la implementación de la práctica cultural de manejo de la enfermedad denominada poda temprana (Figura 2-1), la cual tiene como propósito, la interrupción del ciclo de vida del agente causal (*M. fijiensis* M. Morelet), en estadios asintomáticos o muy tempranos de la enfermedad. La práctica consiste en la eliminación semanal de la parte apical de la hoja tres (aproximadamente 10%), contadas de arriba hacia abajo, sin importar si esta presenta o no los síntomas de la enfermedad, en todas las plantas del cultivo. Con esta práctica se interrumpe oportunamente la producción tanto, de estructuras reproductivas asexuales como sexuales y en consecuencia los procesos de reinfección de la enfermedad hacia otras áreas o plantas vecinas.

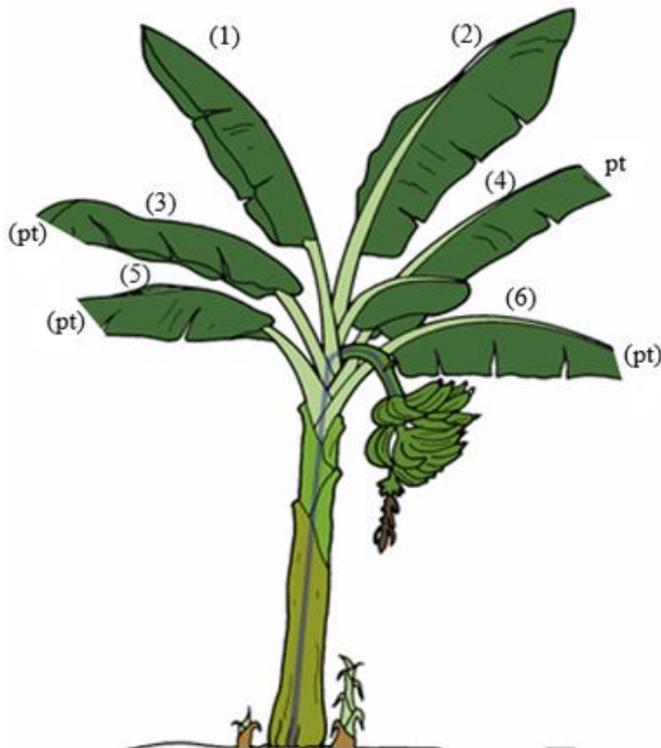
2.2.1 Toma de datos

- Localización

La investigación se desarrolló en tres fincas colindantes (en adelante: fincas A, B y C), dedicadas a la producción comercial de banano, con un área total de 200 ha; para las cuales, el manejo químico aéreo de la SN, fue realizado por una empresa comercial como un solo bloque y bajo el mismo programa de fumigación. Las fincas se encuentran ubicadas en el municipio de Carepa (Antioquia), región de Urabá (Colombia).

En la finca A, a partir de la semana seis del año 2006, se inició con el programa de manejo cultural de la SN poda temprana, como complemento al manejo químico, realizado por la empresa en el bloque. Las fincas B y C, continuaron con el manejo cultural tradicional, complementario al programa químico; el cual consistió en, la eliminación con una herramienta cortante, de las áreas de la hoja en estadios avanzados de la enfermedad, cinco a seis según la escala propuesta por Fouré (1985).

Figura 2-1: Representación de la práctica cultural de manejo de la SN en la planta de banano, denominada poda temprana.



(1-6)Hoja de la planta. (pt)Hojas en las cuales se realizó la poda temprana semanal.

- Evaluación de variables

Se instalaron cinco parcelas en la finca A, seis en la B y dos en la C. La evaluación de la enfermedad se realizó siguiendo el método de preaviso biológico propuesto por Fouré y Ganry (2008), mediante el cual y, a partir de la observación semanal del número de hojas por planta (10 plantas por parcela), estado de desarrollo de la hoja cigarro, síntoma más avanzado de la enfermedad y densidad de síntomas en las hojas dos, tres y cuatro, se calculó el EE de la enfermedad. La variable biológica, se registró semanalmente entre la semana 22 a la 47 de 2006 en las fincas A y B, y, entre la 22 a la 44 de 2006, en la finca C.

En cuanto a las variables climáticas, a partir de un pluviómetro que comparten las fincas, se registró semanalmente la precipitación desde la primera semana hasta la semana 47 de 2006; los valores diarios de temperatura mínima y máxima, humedad relativa y brillo solar, se obtuvieron desde el primero de enero de 2006 hasta el 31 de diciembre del mismo

año a partir de la estación Uniban con código 12015020 (7.8261N, -76.6513W), la cual se encuentra ubicada en la región bananera de Urabá antioqueño y es administrada por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales – IDEAM. Los datos faltantes para la información climática con frecuencia diaria fueron simulados mediante el software SueMulador, el cual genera datos diarios de precipitación (mm), brillo solar (horas), humedad relativa (%) y temperaturas (°C) (mínima y máxima) a través de un proceso estocástico markoviano, para suplir los datos faltantes de las series climáticas de las estaciones meteorológicas ubicadas en zonas ecuatoriales (Chica *et al*, 2014).

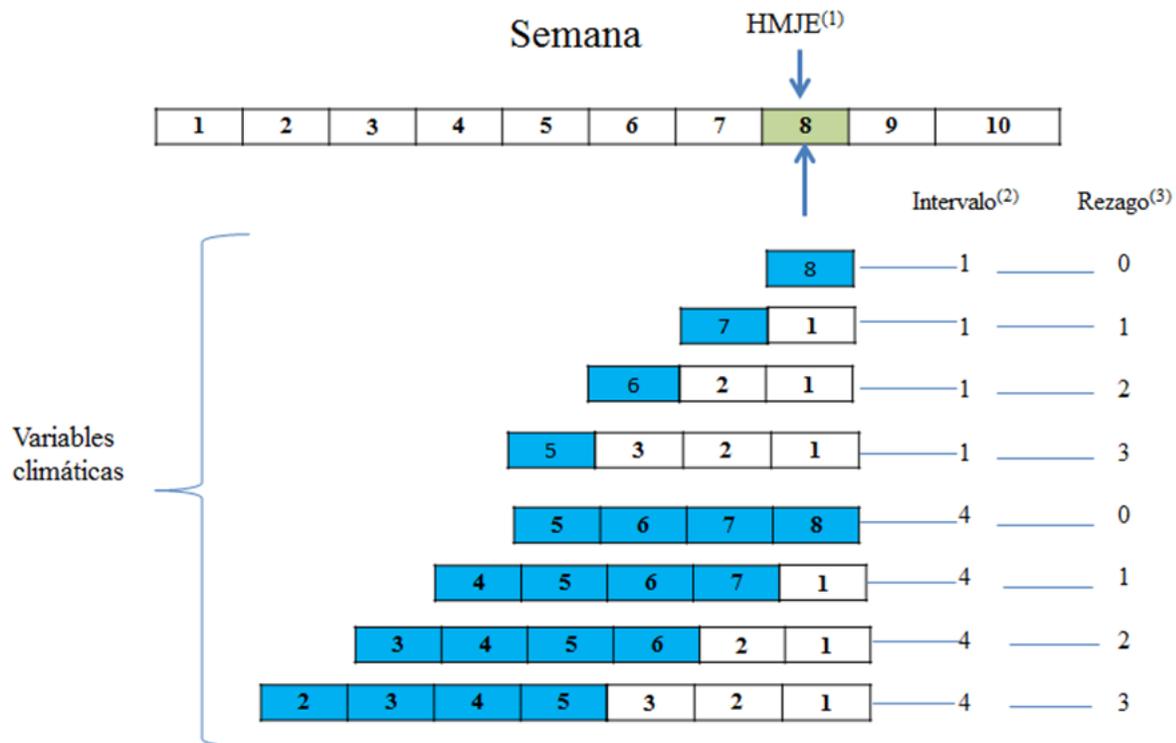
A partir de los datos climáticos diarios, se construyó una serie climática con frecuencia semanal y se generaron además otras variables climáticas, así: para las variables temperatura, humedad relativa y brillo solar, se identificó el valor mínimo y máximo semanal, se calculó el valor medio y, se acumularon las horas de brillo solar durante cada una de las semanas para obtener el valor de brillo solar acumulado.

2.2.2 Análisis estadístico

- Búsqueda iterativa de correlaciones

Se buscó iterativamente, el mejor intervalo de tiempo de acumulación o promediado, de máximo o mínimo según la naturaleza de la variable y el rezago que las variables climáticas debían tener, los cuales generaban la mayor correlación con la variable biológica. Se construyeron intervalos de acumulación, de promediado, de mínimos o de máximos desde dos hasta 10 semanas. Las variables acumuladas fueron precipitación y brillo solar, mientras que las promediadas fueron la temperatura, la humedad relativa y el brillo solar, y se buscaron los valores mínimos y máximos para las variables temperatura, humedad relativa y brillo solar. El rezago para relacionar la variable biológica con las climáticas fue entre las cero a 12 semanas (Figura 2-2). El nivel de asociación entre las variables se realizó mediante el coeficiente de correlación de Pearson (r), con el cual se buscó el valor de la variable climática promediada, acumulada, mínima o máxima y su rezago temporal que mayor relación positiva o negativa y significancia (valor $p < 0.05$) presentara con el EE.

Figura 2-2: Esquema de la evaluación de la relación entre la variable biológica y las variables climáticas.



⁽¹⁾Hoja más joven enferma - HMJE evaluada en la semana 8 del año. ⁽²⁾Período de tiempo en el que la variable climática fue acumulada o promediada. ⁽³⁾Desfase temporal de la relación entre la variable HMJE y la variable climática.

- Construcción y validación de modelos predictivos

Se construyeron modelos de regresión lineal múltiple a nivel de finca, para la variable EE, en función de las variables climáticas acumuladas, promediadas, de máxima y de mínima con mayor valor absoluto de asociación, evaluando el efecto principal y sus interacciones. Los modelos más parsimoniosos se obtuvieron mediante la metodología Backward Stepwise (paquete MASS, función stepAIC desarrollada por Venables y Ripley (2002)) y según el criterio de información de Akaike, por medio del cual se seleccionó el modelo con la menor cantidad de parámetros y el mejor coeficiente de determinación ajustado (R^2). Finalmente, para la validación del modelo, se estimó el error cuadrado medio de predicción (ECM) a partir de la función repCV del paquete cvTools (Alfons, 2012). Todos los procedimientos anteriores, desarrollados en el software R (R Core Team, 2016).

Según Freitez *et al* (2009) “Este tipo de modelos lineales de predicción numérica vienen dados de la siguiente manera (ver Ecuación (2.1)):

$$y_i = a_1x_1^{(n,m)} \pm a_2x_2^{(n,m)} \pm \dots \pm a_jx_j^{(n,m)} \pm \varepsilon \quad (2.1)$$

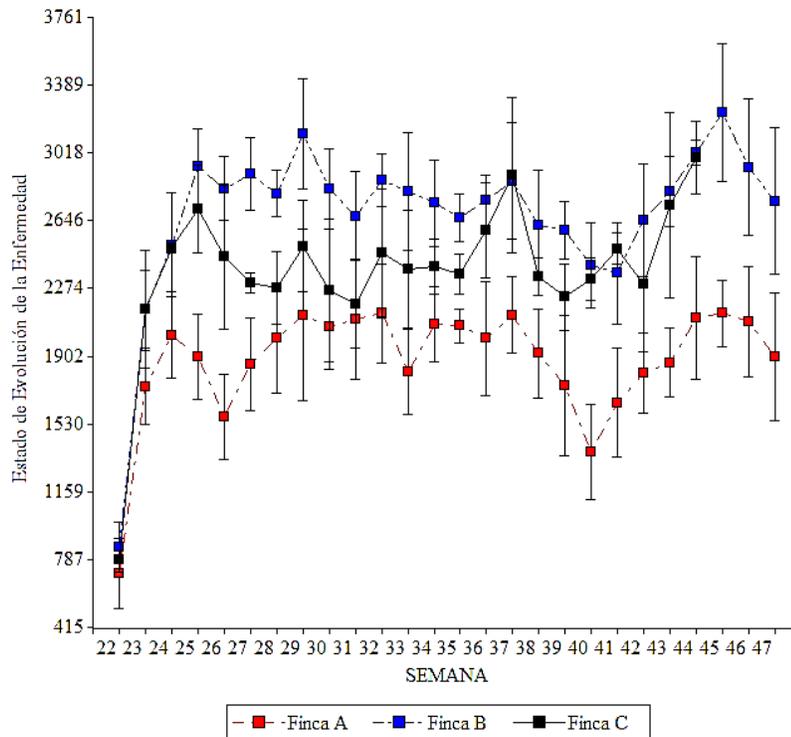
Donde $x_j^{(n,m)}$ es el valor promediado o acumulado de la variable climatológica j , con una amplitud de ventana de n días consecutivos, la cual se encuentra con m días de retardo respecto a la fecha de medición de la variable biológica (a_j y ε se interpretan de la manera usual).”

2.3 Resultados y discusión

2.3.1 Variables climáticas que explican el estado de evolución de la Sigatoka negra

Se evidencia, de manera descriptiva, que el EE se encontraba en niveles bajos, en la zona de estudio, para la semana 22, los cuales se presentaban alrededor de las 787 unidades (Figura 2-3), en las tres fincas, lo que refleja la oferta ambiental seca, fría y de fuertes corrientes de aire, presentada al inicio del año en las semanas 1 a 10, lo que desfavorece la evolución de la enfermedad en el cultivo. A partir de la semana 10 que inicia el período lluvioso y caliente, se mejora la oferta ambiental para el desarrollo de la enfermedad; lo cual se ve reflejado en el aumento abrupto presentado por la enfermedad entre las semanas 23 a 26, a partir de la cual se observa un comportamiento más o menos estable, con una disminución entre la semana 37 a 41 debido a la época de menores precipitaciones en las semanas precedentes (Figura 2-4) y, con un posterior aumento en el nivel de la enfermedad, por el favorecimiento de las condiciones ambientales a partir de la semana 37. Como lo afirman Hernández *et al* (2005) el comportamiento de la enfermedad estuvo sujeto a una dinámica que dependió de las condiciones ambientales, la cual mostró diferentes fases de desarrollo.

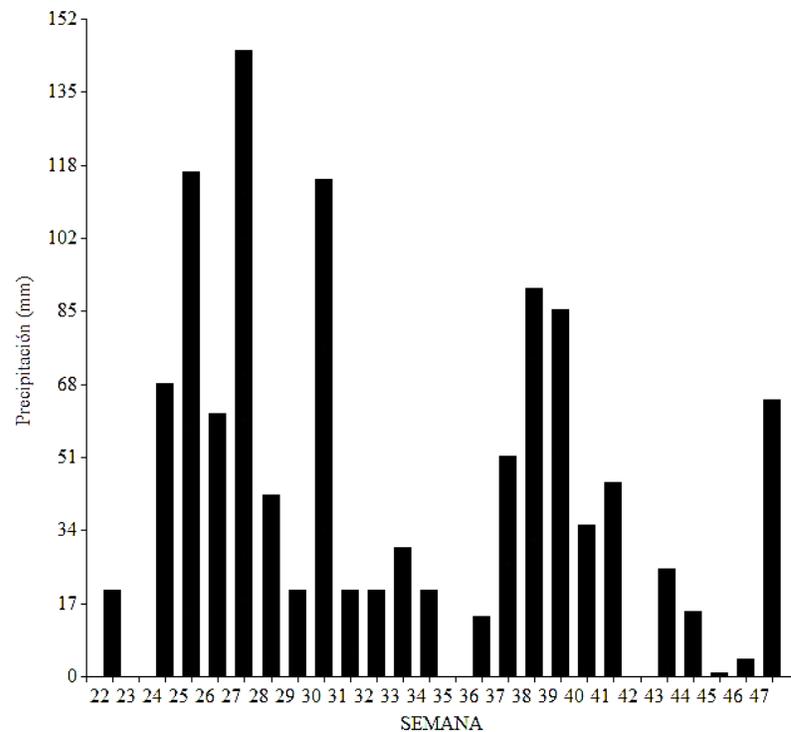
Figura 2-3: Dinámica temporal del estado de evolución de la enfermedad en tres fincas bananeras⁽¹⁾ de la región de Urabá, Colombia.



⁽¹⁾En la Finca A se implementó la práctica de manejo cultural de la Sigatoka negra de poda temprana, en las B y C eliminación de áreas necrosadas, estadios 5 y 6 de la enfermedad.

Aunque el comportamiento de la enfermedad en las tres fincas es similar, la magnitud de esta, es mucho menor en la finca A, donde se realiza la poda temprana, ya que la práctica permite de manera efectiva y significativa interrumpir el ciclo de vida del agente causal de la enfermedad en estadios tempranos (uno y dos), impidiendo la producción de estructuras reproductivas y propagativas de corta y larga distancia como lo son las conidias y las ascosporas, respectivamente, reduciendo a su vez la presión de inóculo en la finca.

Figura 2-4: Precipitación (mm) acumulada en las semanas 22 a 47 de 2006.



A nivel específico, para la dinámica del EE en función de las variables climáticas, se tiene que el brillo solar mínimo fue la variable climática con mayor nivel de relación individual ($|-0.82| \geq r \leq 0.84$, $0.67 \geq R^2 \leq 0.71$) (Tabla 2-1 y Tabla 2-2), con períodos de acumulación de tres semanas y registrados con una anterioridad o rezago, a la evaluación de la enfermedad, de 12 semanas, para las fincas en las que la asociación fue directa (fincas B y C) y, de cinco y seis semanas, respectivamente, para la finca en la que la relación fue inversa, finca A.

Tabla 2-1: Intervalos y rezagos de las variables climáticas semanales, con mayores coeficientes de correlación positivos de Pearson (r) respecto a la variable biológica estado de evolución de la enfermedad.

Finca	Intervalo / rezago (semanas)	PP ⁽¹⁾	Tmin ⁽²⁾	Tmed ⁽³⁾	Tmax ⁽⁴⁾	HRmin ⁽⁵⁾	HRmed ⁽⁶⁾	HRmax ⁽⁷⁾	Bmin ⁽⁸⁾	Bmed ⁽⁹⁾	Bmax ⁽¹⁰⁾
A	Intervalo	4	2	4	10	4	1	5	3	10	2
	Rezago	5	1	1	4	8	9	11	12	12	10
	r ⁽¹¹⁾	0.62	0.48	0.51	0.70	0.50	0.55	0.85	0.54	0.41	0.55
	R ²⁽¹²⁾	0.38	0.23	0.26	0.49	0.25	0.31	0.72	0.29	0.17	0.30
B	Intervalo	4	7	2	10	2	5	7	3	10	3
	Rezago	5	12	1	1	9	7	9	12	12	10
	r ⁽¹¹⁾	0.58	0.67	0.62	0.60	0.66	0.48	0.69	0.84	0.64	0.77
	R ²⁽¹²⁾	0.34	0.44	0.39	0.36	0.44	0.23	0.48	0.70	0.41	0.60
C	Intervalo	1	10	2	1	5	5	5	3	4	3
	Rezago	7	11	9	1	6	7	10	12	10	9
	r ⁽¹¹⁾	0.22 ⁽¹³⁾	0.71	0.57	0.52	0.65	0.74	0.60	0.84	0.68	0.75
	R ²⁽¹²⁾	0.05	0.51	0.33	0.27	0.42	0.55	0.36	0.71	0.46	0.56

⁽¹⁾Precipitación. ⁽²⁾Temperatura mínima. ⁽³⁾Temperatura media. ⁽⁴⁾Temperatura máxima. ⁽⁵⁾Humedad relativa mínima. ⁽⁶⁾Humedad relativa media. ⁽⁷⁾Humedad relativa máxima. ⁽⁸⁾Brillo solar mínimo. ⁽⁹⁾Brillo solar medio / acumulado. ⁽¹⁰⁾Brillo solar máximo. ⁽¹¹⁾Coefficiente de correlación de Pearson con significancia < 0.05. ⁽¹²⁾Coefficiente de determinación.

Martínez (2003), a partir de la evaluación de componentes alométricos y fitosanitarios en plantaciones de plátano (*Musa* AAB Simmonds, cv. Hartón) bajo diferentes arreglos agroforestales y a plena exposición, concluyó, que: plantas sembradas bajo sombrío se comportaron en forma diferente respecto a la severidad de la SN, puesto que, en plantas sembradas a plena exposición solar, la hoja más joven manchada (HMJM) se identificó en la posición número tres y en plantas sembradas bajo penumbra, en la seis. Resultados similares encontraron Barrera *et al* (2016) al identificar la HMJE bajo condiciones de cultivo con sombrío entre la 10 y 11, siendo los tratamientos con 20, 35 y 50% de penumbra estadísticamente iguales entre sí y significativamente superiores al testigo, 0% de sombrío. Gauhl (1994) obtuvo resultados equivalentes al comparar el tiempo de aparición de síntomas en hojas a plena exposición y bajo sombrío. Según Belalcázar *et al* (2003) una

menor cantidad de luz, hace que se disminuya la toxicidad del cercosporin (toxina involucrada en la patogénesis (Daub y Chung, 2007)), cuya toxicidad se incrementa en presencia de la luz.

Tabla 2-2: Intervalos y rezagos de las variables climáticas semanales, con mayores coeficientes de correlación negativos de Pearson (r) respecto a la variable biológica Estado de Evolución de la Enfermedad.

Finca	Intervalo / rezago (semanas)	PP ⁽¹⁾	Tmin ⁽²⁾	Tmed ⁽³⁾	Tmax ⁽⁴⁾	HRmin ⁽⁵⁾	HRmed ⁽⁶⁾	HRmax ⁽⁷⁾	Bmin ⁽⁸⁾	Bmed ⁽⁹⁾	Bmax ⁽¹⁰⁾
A	Intervalo	4	1	4	6	4	4	3	5	4	4
	Rezago	12	12	12	12	12	11	6	6	6	5
	r ⁽¹¹⁾	-0.51 ⁽¹³⁾	-0.71	-0.64	-0.61	-0.75	-0.67	-0.46	-0.82	-0.69	-0.67
	R ² ⁽¹²⁾	0.26	0.50	0.41	0.37	0.56	0.45	0.21	0.67	0.47	0.45
B	Intervalo	4	9	5	7	5	6	3	7	2	4
	Rezago	11	4	4	11	12	1	6	4	6	4
	r ⁽¹¹⁾	-0.61	-0.75	-0.51	-0.65	-0.68	-0.67	-0.44 ⁽¹³⁾	-0.73	-0.59	-0.49
	R ² ⁽¹²⁾	0.38	0.57	0.26	0.42	0.46	0.45	0.19	0.53	0.35	0.24
C	Intervalo	4	2	2	1	2	2	8	9	1	5
	Rezago	12	3	3	7	4	12	12	2	7	12
	r ⁽¹¹⁾	-0.85	-0.58	-0.32 ⁽¹³⁾	-0.39 ⁽¹³⁾	-0.68	-0.79	-0.64	-0.31 ⁽¹³⁾	-0.09	-0.75
	R ² ⁽¹²⁾	0.72	0.34	0.11	0.15	0.47	0.63	0.41	0.10	0.01	0.56

⁽¹⁾Precipitación. ⁽²⁾Temperatura mínima. ⁽³⁾Temperatura media. ⁽⁴⁾Temperatura máxima. ⁽⁵⁾Humedad relativa mínima. ⁽⁶⁾Humedad relativa media. ⁽⁷⁾Humedad relativa máxima. ⁽⁸⁾Brillo solar mínimo. ⁽⁹⁾Brillo solar medio / acumulado. ⁽¹⁰⁾Brillo solar máximo. ⁽¹¹⁾Coefficiente de correlación de Pearson con significancia < 0.05. ⁽¹²⁾Coefficiente de determinación. ⁽¹³⁾Coefficiente de correlación de Pearson no significativo > 0.05.

Sepúlveda *et al* (2006) bajo condiciones *in vitro*, encontraron un progresivo aumento en el número de conidias en relación al tiempo de exposición a la luz, lo que los llevó a concluir que el desarrollo asexual (producción de conidias) de este patógeno es dependiente y pareciera presentar una relación directa con el lapso de tiempo que se exponga a este factor. Así, la asociación directa entre el EE y el brillo solar mínimo acumulado y rezagado, durante tres y 12 semanas, respectivamente, para las tres fincas (Tabla 2-1), ilustra la alta

nubosidad en la región de Urabá (lo que afecta el número de horas sol según Salazar (2012)), por lo que, el aumento de la presión de inoculo y magnitud de la enfermedad, se encuentra precedido por semanas con los mayores mínimos de brillo solar, que anteceden a las semanas de mayor precipitación acumulada, que es cuando se da la mayor liberación de las estructuras reproductivas del patógeno y aumenta progresivamente las reinfecciones al interior de la plantación. Para la finca A, donde se implementó la práctica cultural de manejo de la SN denominada poda temprana, la mayor asociación se presentó cuando la variable climática se acumuló y rezagó durante cinco y seis semanas, respectivamente, configurándose una relación inversa entre las variables, donde posiblemente, debido al efecto de la poda, la cual aumenta la cantidad de luz que ingresa en el perfil del dosel al disminuir el área fotosintéticamente activa de la planta y modifica el microclima de la plantación, se observe el efecto inhibitorio sobre las estructuras reproductivas del patógeno y la respuesta a condiciones ambientales menos favorables para el desarrollo del mismo y con la luz posiblemente, y según Belalcázar *et al* (2003) la humedad relativa y la temperatura, que afectan entre otros aspectos la presencia de agua de condensación, indispensable para la germinación de las conidias.

La HR máxima y media, y el brillo solar medio, para las fincas A, B y C, respectivamente, fueron las variables climáticas con menor nivel de relación ($r \leq |0.48|$, $R^2 \leq 0.23$) con el EE. Las demás variables, precipitación acumulada, temperatura mínima, media y máxima, HR mínima, brillo solar mínimo y máximo se ubican en un nivel intermedio de asociación, respecto a las variables anteriores, entre el progreso de la enfermedad en la planta y la variable en cuestión, según la finca.

La precipitación, por ejemplo, cuando se acumuló durante cuatro semanas y su rezago respecto al EE fue de cinco semanas, exhibió una asociación directa con la variable biológica ($0.58 \geq r \leq 0.62$, $0.34 \geq R^2 \leq 0.38$), para las fincas A y B, similar a los resultados obtenidos por Pérez-Vicente *et al* (2000) quienes encontraron una asociación directa ($0.54 \geq r \leq 0.80$, valor $p < 0.001$) entre la cantidad de lluvia acumulada durante siete, 10, 14 y 28 días y el estado de evolución de la enfermedad de dos a cinco semanas después.

El tipo de relación entre el EE y las diferentes variables climáticas, al ser significativas (valor $p < 0.05$), para ambos tipos de asociaciones, directos (Tabla 2-1) e indirectos (Tabla

2-2), presentándose casos para los que no se cumple (p. ej. la relación entre la precipitación y el EE en las fincas A y C, no es significativa (valor $p > 0.05$), para su mejor coeficiente de determinación cuando se evaluó una asociación inversa y directa, respectivamente), permite identificar momentos en los que las diversas configuraciones de las variables climáticas, cuando su relación es directa, acentúa el impacto de la enfermedad en la plantación y otros en el que este disminuye, cuando su asociación es inversa. Así, por ejemplo, la precipitación para la finca B, acumulada durante cuatro semanas y con un rezago de cinco semanas respecto a la fecha de medición del EE, incrementa el impacto de la enfermedad sobre la plantación, sin embargo, cuando esta misma se acumula durante cuatro semanas y su rezago es de 11 semanas, ilustra la disminución de la magnitud del EE posiblemente a que el evento climático favoreció el desarrollo de la plantación sobre el desarrollo del patógeno, o el evento afectó tanto al hospedante como a hospedero pero ejerció mayor impacto sobre este último. Bajo condiciones ambientales favorables en Costa Rica, y en un hospedante susceptible Marín *et al* (2003) encontraron que el período de incubación puede ser tan corto como de 13 a 14 días, mientras que, durante períodos desfavorables, el período de incubación puede extenderse hasta los 35 días.

Finalmente, al compararse las fincas según las prácticas culturales implementadas, se observa que el efecto directo de la temperatura sobre el EE y su mayor asociación, se obtiene para las fincas B y C (las cuales continuaron con el manejo cultural tradicional y no implementaron práctica denominada poda temprana), respecto a la temperatura mínima para valores acumulados de siete y 10 semanas, respectivamente y, rezagados de 11 y 12 semanas respectivamente y, para la finca A (la cual además de implementar la práctica denominada poda temprana, remueve las porciones de las hojas con estadios avanzados de la enfermedad), respecto a la temperatura máxima para valores acumulados y rezagados de 10 y cuatro semanas, respectivamente, evidenciándose como posiblemente las prácticas culturales modifican el nivel de la relación en la variable biológica y las variables climáticas.

Las diferencias, en el tipo y magnitud de las asociaciones, así como, en los tiempos de acumulación y de rezago, afectadas por las prácticas culturales desarrolladas en las parcelas,

refuerzan la idea de desarrollar modelos predictivos específicos a cada finca, y no generales para el bloque de fumigación.

2.3.2 Modelos predictivos para el estado de evolución de la Sigatoka negra

Los modelos más simples predictivos del EE en función del mejor período de acumulación o promediado, de máximo o mínimo y rezago de las variables climáticas según su naturaleza, para cada finca (Tabla 2-3), fueron obtenidos considerando solo la variable climática que presentara mayor valor absoluto de asociación (p. ej. los valores de temperatura mínima considerados en la construcción del modelo de la finca A, correspondieron a los ubicados en la semana 12 previa a la evaluación de la variable biológica (Tabla 2-2)), mediante la metodología de selección de variables Backward Stepwise, con mayor coeficiente de determinación ajustado (R^2) y menor error cuadrado medio de predicción (ECM). No obstante, todos los modelos fueron significativos (valor $p < 0.05$) y, los residuales de los modelos se ajustaron a una distribución normal (Test Shapiro-Wilk, valor $p > 0.01$), los modelos para las fincas B y C, presentaron un mayor error cuadrado medio de predicción, $559 \pm 300 \geq \text{ECM} \leq 745 \pm 278$, en comparación con la finca A, $\text{ECM} = 117 \pm 46.5$, lo que implica que no son unos buenos modelos predictivos, por lo que: se evaluó el nivel de asociación entre el EE y el producto de las variables climáticas previamente seleccionadas mediante el coeficiente de correlación de Pearson (r) (no se incluyen los resultados obtenidos) y, a partir de las variables con mayor relación y significancia (valor $p < 0.05$), se construyeron modelos en los que se consideró la interacción de las variables climáticas (Tabla 2-4). Obteniendo, que solo disminuyó el error cuadrado medio de predicción y mejoró el coeficiente de determinación para la finca B, $\text{ECM} = 136 \pm 25.6$ y $R^2 = 0.83$, en comparación cuando solo se consideró el efecto aditivo de las variables climáticas, $\text{ECM} = 559 \pm 300$ y $R^2 = 0.72$. Sin embargo, para la finca C, el error cuadrado medio de predicción aumentó, $\text{ECM} = 1447 \pm 3012$, en comparación cuando solo se consideró el efecto aditivo de las variables climáticas, $\text{ECM} = 745 \pm 278$, por lo que los modelos generados para esta finca, independiente de si se considera el efecto aditivo o el de la interacción de las variables, no son un buen modelo, posiblemente producto del tamaño de muestra, para el estudio de caso, número de semanas durante las que se evaluó la variable biológica.

En los modelos aditivos (Tabla 2-3), solo cuatro variables (temperatura media, humedad relativa mínima y promedia y, el brillo solar máximo) fueron consistentes, en los modelos ajustados para todas las fincas. Las demás variables, fueron importantes dependiendo de la finca. La temperatura mínima y máxima y, el brillo solar promedio, por ejemplo, fueron incluidos exclusivamente en los modelos de las fincas: C, B y A, respectivamente. Cuando se consideró, en los modelos, la interacción de las variables climáticas (Tabla 2-4), se modificó la estructura de relación. En este caso, las variables más consistentes en todos los modelos fueron, la temperatura media en interacción con el brillo solar mínimo, las demás fueron importantes dependiendo de la finca. Por lo que; la configuración de variables e interacción entre estas, particular a cada finca, refuerza la propuesta de modelos específicos, más que un modelo general para el bloque de fumigación.

Para el patosistema *M. fijiensis* – *Musa* AAB cv Hartón: Hernández *et al* (2005) encontraron que el método más adecuado para determinar la ecuación de regresión que explicó el comportamiento de la enfermedad, resultó ser aquel donde consideraron los valores acumulados consecutivos por semanas de las variables precipitación, humedad relativa, temperatura máxima y mínima, evaporación y nubosidad, sin embargo, solo lograron explicar el 33.32% del comportamiento de la enfermedad por los valores acumulados durante seis semanas consecutivas de las variables nubosidad, temperatura mínima, humedad relativa y evaporación, previos a la evaluación de la enfermedad en campo; Hernández *et al* (2009) obtuvieron un modelo que permitió pronosticar el comportamiento de la severidad de la enfermedad con un coeficiente de determinación ajustado (R^2) de 0.67 (valor $p < 0.01$), a partir de los valores acumulados durante seis semanas consecutivas de las variables nubosidad e insolación y previas de la evaluación de la enfermedad, y; Freitez *et al* (2009) generaron un modelo para la hoja más joven manchada y, sin discriminación por época del año, a partir de la humedad relativa y la radiación solar con un coeficiente de determinación ajustado (R^2) de 0.71.

Tabla 2-3: Parámetros de los modelos predictivos (valor $p < 0.05$) del nivel de enfermedad de Sigatoka negra, estado de evolución de la enfermedad, en función del efecto aditivo de las variables climáticas semanales, con el periodo de acumulación o promedio y rezago más relacionados, con esta, para cada una de las fincas, de la región de Urabá, Colombia.

Finca	Parámetros											R ² (12)	Shapiro-W.(13)	ECM (X ± S)(14)
	β_0 (1)	X1(2)	X2(3)	X3(4)	X4(5)	X5(6)	X6(7)	X7(8)	X8(9)	X9(10)	X10(11)			
A	25447.3	-	-	-188.4	-	-120.5	-149.6	42.8(15)	-	-	53.2(15)	0.95	0.18	117 ± 46.5
B	-53138.8(15)	3.2(15)	-	-262.3(15)	-189.0(15)	1034.5(15)	-261.8(15)	-	1210.2	1714.5(15)	-87.1(15)	0.71	0.72	559 ± 300
C	84383.5(15)	-1.3(15)	-2651.3(15)	144.0(15)	-	59.6(15)	-122.5(15)	-285.7(15)	520.3	-	70.7(15)	0.97	0.90	745 ± 278

(1)Intercepto. (2)Precipitación. (3)Temperatura mínima. (4)Temperatura media. (5)Temperatura máxima. (6)Humedad relativa mínima. (7)Humedad relativa promedio. (8)Humedad relativa máxima. (9)Brillo solar mínimo. (10)Brillo solar promedio. (11)Brillo solar máximo. (12)Coeficiente de determinación ajustado. (13)Test Shapiro-Wilk. (14)Error Cuadrado Medio de predicción. (15)Variable no significativa en el modelo, valor $p \geq 0.05$.

Tabla 2-4: Parámetros de los modelos predictivos (valor $p < 0.05$) del nivel de enfermedad de Sigatoka negra, estado de evolución de la enfermedad, en función del efecto interactivo de las variables climáticas semanales, con el periodo de acumulación o promedio y rezago más relacionados, con esta, para cada una de las fincas, de la región de Urabá, Colombia.

F.(1)	Parámetros																		R ² (13)	Shapiro-W.(14)	ECM (X ± S)(15)	
	β_0 (2)	X1(3):X2(4)	X1:X3(5)	X1:X4(6)	X1:X5(7)	X1:X6(8)	X1:X7(9)	X1:X8(10)	X1:X9(11)	X1:X10(12)	X2:X5	X2:X6	X2:X7	X2:X8	X2:X9	X2:X10	X3:X5	X3:X6				X3:X7
		X3:X8	X3:X9	X3:X10	X4:X5	X4:X6	X4:X7	X4:X8	X4:X9	X4:X10	X5:X8	X5:X9	X5:X10	X6:X8	X6:X9	X6:X10	X7:X8	X7:X9				X7:X10
A	8207.22	-0.11(16)	-	-	-	-	-0.03(16)	-	1.59	-	-	-	-	-263.55(16)	-	-	-2.90	-	-	0.96	0.15	133 ± 63.1
		-99.29(16)	-	-	-	-	-	-	-	-	105.00(16)	-	-	-	-	-	-	-	-			
B	3507.68	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-4.44	-	3.26	-	-	-	-	-	-	0.83	0.56	136 ± 25.6
		389.86	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-109.04	-	-			
C	2606.77	1.28(16)	0.80(16)	-	-	-0.87(16)	-0.45	-	-	-	-	-	-	-966.80	-	-	-	-	-	0.96	0.83	1447 ± 3012
		695.68	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-			

(1)Finca. (2)Intercepto. (3)Precipitación. (4)Temperatura mínima. (5)Temperatura media. (6)Temperatura máxima. (7)Humedad relativa mínima. (8)Humedad relativa promedio. (9)Humedad relativa máxima. (10)Brillo solar mínimo. (11)Brillo solar promedio. (12)Brillo solar máximo. (13)Coeficiente de determinación ajustado. (14)Test Shapiro-Wilk. (15)Error Cuadrado Medio de predicción. (16)Variable no significativa en el modelo, valor $p \geq 0.05$.

3. Modelamiento de la severidad de la Sigatoka negra en función de variables climáticas

Resumen

Mycosphaerella fijiensis M. Morelet, es uno de los agentes causales del “complejo Sigatoka”, el cual, es la enfermedad más destructiva en los cultivos de banano y plátano. El objetivo del presente trabajo fue el de predecir la severidad de la Sigatoka negra en las fincas según registros climáticos. En ese sentido, para 10 fincas bananeras de la región de Urabá, se generaron modelos de regresión lineal múltiple mediante la metodología Backward Stepwise, para la hoja más joven enferma – HMJE, como variable biológica indicadora del estado de severidad de la enfermedad en la plantación, en función de variables climáticas acumuladas, promediadas, de máxima y de mínima con frecuencia diaria y semanal, además de sus interacciones y condicionando adicionalmente su efecto por la co-variable ENSO. En cada finca, la HMJE, se evaluó desde la primera semana de 2004 hasta la semana 22 de 2008; la precipitación, se registró semanalmente desde la primera semana de 2003 hasta la semana 22 de 2008 y; para la temperatura mínima y máxima, humedad relativa y brillo solar, se obtuvieron valores diarios durante el mismo período a partir de estaciones cercanas a las fincas. Se encontraron modelos con mayor capacidad predictiva en cada una de las fincas, cuando estos consideraron la interacción de las variables climáticas ($0.63 \geq R^2 \leq 0.84$, $0.54 \pm 0.01 \geq ECM \leq 0.98 \pm 0.02$). La precipitación y el ENSO en su condición normal, fueron consistentes, en los modelos ajustados para todas las fincas cuando solo se consideró el efecto aditivo de las variables climáticas y, la temperatura máxima, cuando se incluyó la interacción de estas.

Palabras clave: *Pseudocercospora fijiensis*, *Musa* sp., Cavendish, coeficiente de determinación.

3.1 Introducción

Los patrones de temperatura y humedad (número de horas que la superficie de la hoja permanece húmeda), y los de evolución de la enfermedad, plantean la existencia de una estrecha relación entre los factores climáticos como la humedad relativa, la temperatura y la precipitación con el patógeno, los cuales condicionan la incidencia y severidad de la enfermedad (Aguirre *et al*, 2012), además del estado nutricional de la planta (Hernández *et al*, 2009). Según Hernández *et al* (2005) la severidad de la enfermedad, depende del comportamiento de la temperatura del aire, la duración de las horas con rocío y de las lluvias, haciéndose más severa a mayor humedad relativa y alta precipitación. Así, Gauhl (1994) encontró que fuertes lluvias, que resultaron en baja evaporación y temperaturas mínimas más altas, tuvieron un efecto favorable sobre la enfermedad y, por tanto, sobre la hoja más joven enferma - HMJE. Por ejemplo, Marín *et al* (2003) bajo condiciones ambientales favorables en Costa Rica, y en un hospedante susceptible, afirman que el período de incubación puede ser tan corto como de 13 a 14 días, mientras que, durante períodos desfavorables, el período de incubación puede extenderse hasta los 35 días y, el período de latencia oscila desde los 25 días durante la temporada húmeda hasta los 70 días durante la temporada seca.

En el contexto mundial, en los últimos años, el uso de modelos de cultivos se ha masificado debido a su utilidad como herramienta para la reducción de la incertidumbre en el momento de tomar decisiones asociadas con el manejo de sistemas de producción agrícola, pecuaria y forestal (Chica *et al*, 2014). Por lo que, cualquier modelo que prevenga el inicio o el desarrollo futuro de enfermedades a partir de información acerca del clima, hospedero, o patógeno, puede ser considerado un modelo de prevención de enfermedades (Costa *et al*, 2002); según Smith *et al* (1997) los cuales podrían ayudar en la gestión de los cultivos y en la reducción de las aplicaciones químicas, costos de producción y pérdidas de cosechas. Así, diversos autores con base en el trabajo desarrollado por Coakley *et al* (1982), como: Chuang y Jeger (1987), Pérez-Vicente *et al* (2000), Hernández *et al* (2005), Freitez *et al* (2009, 2010), y Hernández *et al* (2009) han desarrollado modelos predictivos para la evolución de la enfermedad, SN, en función de variables biológicas y climáticas, buscando anticipar el estado al cual evolucionará la enfermedad para mejorar la eficacia de las aplicaciones y así reducir el número de ciclos. Otros, como Landry *et al* (2013)

desarrollaron un modelo mecánico para facilitar la selección de híbridos resistentes a partir del mejor entendimiento del patosistema y la identificación de componentes de resistencia más efectivos.

Chuang y Jeger (1987), a partir de la incidencia de la enfermedad, cuantificada como el porcentaje de hojas infectadas una semana antes del cálculo de la tasa de incremento de la enfermedad; su valor cuadrático, y ; el producto del valor acumulado de la precipitación durante cuatro semanas y el número de días que durante la semana inmediatamente anterior al cálculo de la tasa de incremento de la enfermedad presentaron una humedad relativa mayor al 90%, generaron un modelo que pronostica con una precisión del 76%, la tasa de incremento de la enfermedad en tres localidades en Taiwán.

Hernández *et al* (2009) durante los años 2002 - 2004, instalaron un experimento para generar un modelo de predicción de SN para los cultivos de plátano (*Musa* AAB cv. Hartón) en el municipio Veroes (Yaracuy, Venezuela) bajo condiciones de fertilización inorgánica del suelo. Los autores encontraron que, el modelo permitió pronosticar el promedio ponderado de infección (PPI) a partir de los valores acumulados de las variables (nubosidad e insolación) seis semanas previas y consecutivas a la última semana de evaluación del PPI, con un coeficiente de determinación $R^2 = 0.72$.

Freitez *et al* (2009, 2010) generaron modelos predictivos para la SN en cultivos de plátano cv. Hartón en el Sur del Lago de Maracaibo (Zulia, Venezuela), y considerando la estacionalidad (temporada de sequía o de lluvias), encontraron que para la temporada de sequía la severidad de la enfermedad se pudo pronosticar con 29 días de antelación, utilizando las variables humedad relativa (14; 29: promediada durante 14 días con una antelación de 29 días); precipitación promedio (13; 41); radiación solar (9; 78), y; velocidad del viento (2; 95); con un coeficiente de determinación de 0.79. En el caso de la temporada lluviosa, la severidad de la enfermedad se pudo pronosticar con 43 días de anticipación, utilizando las variables precipitación acumulada (11; 43) y (13; 57), temperatura promedio (2; 122), evapotranspiración (9; 93) y humedad relativa (3; 71), con un coeficiente de determinación de 0.73. Cuando no se consideraba la estacionalidad, la hoja más joven manchada - HMJM se pudo pronosticar con 23 días de retraso utilizando las variables radiación solar (10; 22) y HR (3; 23) con un coeficiente de determinación de 0.71.

La hoja más joven enferma – HMJE, según Lehmann-Danzinger citado por Gauhl (1994) es una medida indirecta del potencial de infección y del período de latencia. Además, Aguirre *et al* (2012) afirman que en cuanto más joven sea la hoja en la que son detectados los primeros síntomas de la enfermedad, mayor es la severidad de la enfermedad en esa planta. Por lo que, el objetivo de este trabajo consistió en desarrollar y validar modelos predictivos para la severidad de la SN a través de la variable biológica HMJE en banano para la región de Urabá en función de variables climáticas. Dichos modelos fueron muy específicos para cada microclima, lo que conllevó a desarrollar para cada finca su propio modelo de predicción.

3.2 Materiales y metodología

3.2.1 Toma de datos

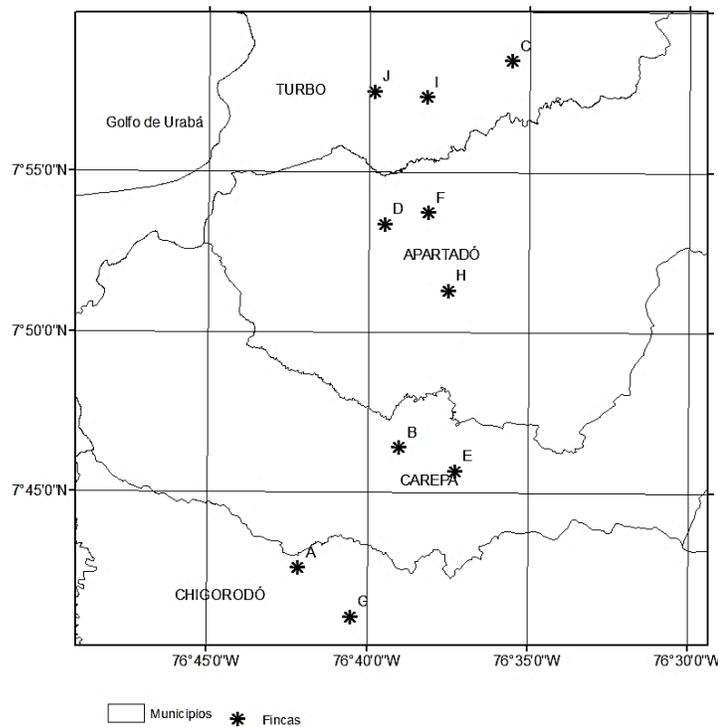
- Localización

La investigación se desarrolló en 10 fincas dedicadas a la producción de banano comercial tipo exportación (*Musa* sp. AAA, subgrupo Cavendish). Estas, fueron seleccionadas, buscando cubrir el gradiente latitudinal de precipitación de la región bananera, la cual aumenta de norte a sur. Es así como, en el sector norte (entre el municipio de Turbo y norte de Apartadó), se seleccionaron cinco fincas; en el sector centro (sur de Apartadó y Carepa), tres fincas y en el sector sur (Chigorodó), dos fincas (Figura 3-1).

- Evaluación de variables

La variable biológica, HMJE, se registró semanalmente desde la primera semana de 2004 hasta la semana 22 de 2008 respectivamente, en cada una de las 10 fincas seleccionadas. Esta, se determinó como el promedio de la evaluación en diez plantas que emitieron recientemente su inflorescencia (menor a una semana) seleccionadas de manera aleatoria, del número de la hoja más joven con evidencias de los primeros síntomas de la enfermedad (estados dos y tres, según los estados de evolución de la enfermedad (EE) descritos por Fouré y Ganry (2008)). Se anota que, la inspección fue realizada por un operario desde el suelo y que la edad de la hoja en la planta de banano aumenta desde la hoja cigarro, parte apical de la planta, hacia el suelo.

Figura 3-1: Ubicación de las fincas en la región bananera de Urabá.¹



En cuanto a las variables climáticas, la precipitación, se registró semanalmente desde la primera semana de 2003 hasta la semana 22 de 2008, en cada una de las fincas; los valores diarios de temperatura mínima y máxima, humedad relativa y brillo solar, se obtuvieron desde el primero de enero de 2003 hasta el 31 de diciembre de 2008 a partir de las estaciones Uniban 12015020 (7.8261N, -76.6513W) y Tulenapa 12015060 (7.7739N, -76.6575W), las cuales se encuentran ubicadas en la región bananera de Urabá antioqueño y son administradas por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales – IDEAM. A las fincas A, B, E y G, se les asignaron los datos de la estación Tulenapa, por mayor proximidad así: a 8.39, 0.92, 4.30 y 9.89 km de distancia a la estación, respectivamente y, a las fincas C, D, F, H, I y J, los datos de la estación Uniban, a 17.7, 7.10, 7.95, 4.37, 14.42 y 14.71 km de distancia a la estación, respectivamente. Para las

¹ Se omite el nombre de las fincas a solicitud de la Comercializadora Internacional Banacol.

semanas en las que se evaluó la HMJE se identificó bajo cuál condición del fenómeno ENSO sucedió, consultando el NOAA / National Weather Service.

Los datos faltantes para la información climática con frecuencia diaria fueron simulados mediante el software SueMulador, el cual genera datos diarios de precipitación (mm), brillo solar (horas), humedad relativa (%) y temperaturas (°C) (mínima y máxima) a través de un proceso estocástico markoviano, para suplir los datos faltantes de las series climáticas de las estaciones meteorológicas ubicadas en zonas ecuatoriales (Chica *et al*, 2014).

A partir de los datos climáticos diarios, se construyó una serie climática con frecuencia semanal y se generaron además otras variables climáticas, así: para las variables temperatura, humedad relativa y brillo solar, se identificó el valor mínimo y máximo semanal, se calculó el valor medio y, se acumularon las horas de brillo solar durante cada una de las semanas para obtener el valor de brillo solar acumulado.

3.2.2 Análisis estadístico

- Búsqueda iterativa de correlaciones

Se buscó iterativamente, el intervalo de tiempo de acumulación o promediado, de máximo o mínimo según la naturaleza de la variable y el rezago que las variables climáticas debían tener, que generaban la mayor correlación con la variable biológica HMJE, ya que como lo afirman Freitez *et al* (2009): “... es posible que el desarrollo de la enfermedad no se deba sólo a un evento en particular, si no a un conjunto de estos. Así mismo, esto no se refiere únicamente a la suma de eventos de diferentes variables climáticas, sí no también a la suma de eventos de una misma variable en períodos y lapsos de tiempo diferentes que pueden afectar el desarrollo de la enfermedad”.

Para los datos climáticos con resolución diaria, se construyeron los intervalos de acumulación, de promediado, de mínimos o de máximos desde los dos a los 120 días. Las variables acumuladas fueron precipitación y brillo solar, mientras que las promediadas fueron la temperatura, la humedad relativa y el brillo solar, y se buscaron los valores mínimos y máximos para las variables temperatura, humedad relativa y brillo solar. El

rezago para relacionar la variable biológica con las climáticas fue entre los cero y los 150 días. De manera similar, cuando las variables climáticas se trabajaron con resolución semanal, el intervalo de acumulación, promediado, mínimo o máxima se construyó desde dos hasta 10 semanas y un rezago temporal para la relación desde cero a 12 semanas. El nivel de asociación entre las variables se evaluó mediante el coeficiente de correlación de Pearson (r), con el cual se buscó el valor de la variable climática promediada, acumulada, mínima o máxima y su rezago temporal que mayor relación positiva o negativa y significancia (valor $p < 0.05$) presentara con la HMJE.

- Construcción y validación de modelos predictivos

Se construyeron modelos de regresión lineal múltiple a nivel de finca, para la variable HMJE, en función de las variables climáticas acumuladas, promediadas, de máxima y de mínima con frecuencia diaria y semanal, evaluando el efecto principal y sus interacciones y condicionando adicionalmente su efecto por la co-variable ENSO. Los modelos más parsimoniosos se obtuvieron mediante la metodología Backward Stepwise (paquete MASS, función stepAIC desarrollada por Venables y Ripley (2002)) y según el criterio de información de Akaike, por medio del cual se seleccionó el modelo con la menor cantidad de parámetros y el mejor coeficiente de determinación ajustado (R^2). Finalmente, para la validación del modelo, se estimó el error cuadrado medio de predicción (ECM) a partir de la función repCV del paquete cvTools (Alfons, 2012). Todos los procedimientos anteriores, desarrollados en el software R (R Core Team, 2016).

3.3 Resultados y discusión

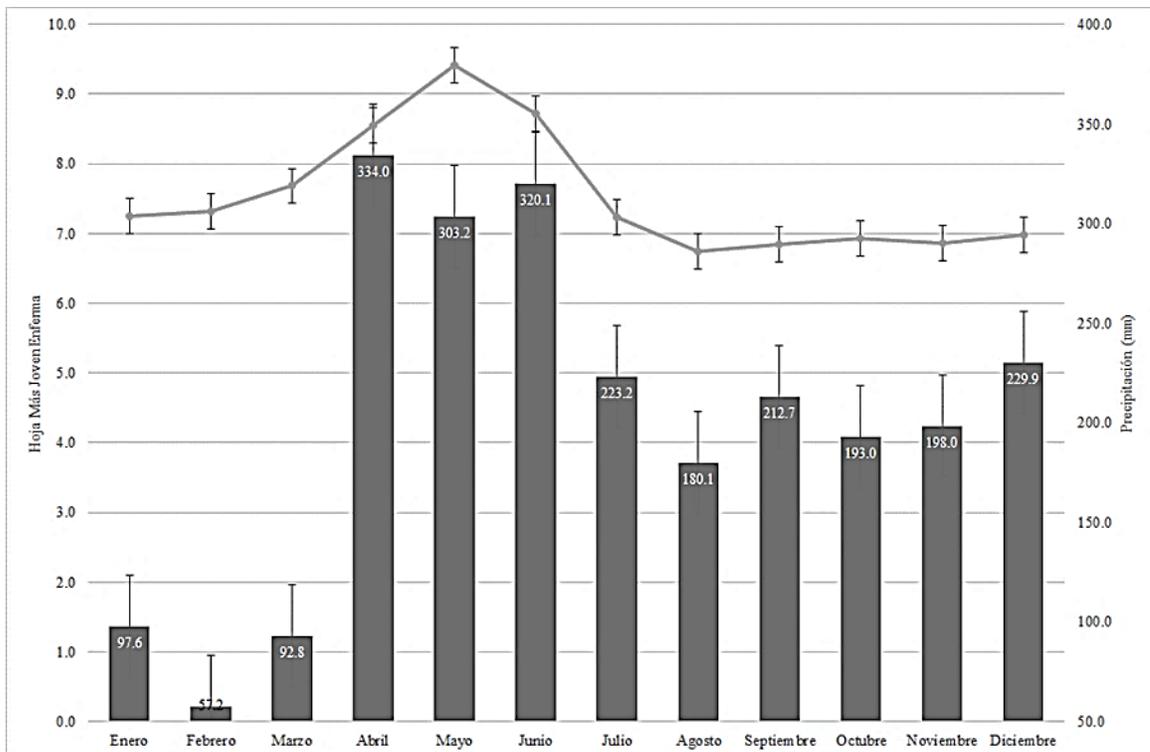
3.3.1 Variables climáticas que explican la Hoja Más Joven Enferma

En términos generales, la precipitación diaria fue la variable climática con mayor nivel de relación individual ($|-0.50| \geq r \leq |-0.77|$, $0.25 \geq R^2 \leq 0.59$) (Tabla 3-1), respecto a la variable HMJE. Este mayor nivel se presentó, para periodos de acumulación de la precipitación, que oscilaron dependiendo de la finca, de entre 58 a 120 días y registrados con una anterioridad o rezago, a la evaluación de la enfermedad, de entre 38 a 68 días. La relación

inversa ilustra el avance de la enfermedad hacia hojas más jóvenes, para valores altos de precipitación acumulada y, a hojas más viejas para valores menores de precipitación acumulada, tal como se observa en la (Figura 3-2, ver: Figura 6-1 a Figura 6-10 (Anexo: Dinámica temporal de la hoja más joven enferma y de la precipitación)), donde: para el tercer trimestre del año (julio - septiembre), la enfermedad se desplazó hacia hojas más jóvenes posterior a los meses de mayor precipitación acumulada, segundo trimestre del año (abril - junio) y, de igual manera, la enfermedad se desplazó a hojas más viejas durante el segundo trimestre del año, posterior al primer trimestre (enero - marzo) donde se registran los meses con menores precipitaciones acumuladas. Gauhl (1994) para el patosistema *M. fijiensis* – *Musa* sp. AAA subgrupo Cavendish, cv Valery, halló una correlación significativa ($r = -0.32$, valor $p < 0.05$) entre la HMJE y el valor rezagado de la precipitación ocho semanas. No obstante, Pérez-Vicente *et al* (2000) encontraron una asociación directa ($0.54 \geq r \leq 0.80$, valor $p < 0.001$) entre la cantidad de lluvia acumulada durante siete, 10, 14 y 28 días y el estado de evolución de la enfermedad de dos a cinco semanas después; Hernández *et al* (2005) entre el Promedio Ponderado de Infección (PPI) y la precipitación acumulada de dos semanas ($r = 0.28$), y; Aguirre *et al* (2012) entre la incidencia de la enfermedad y la precipitación ($r = 0.50$, valor $p < 0.05$), al evaluar la relación entre las variables mediante el coeficiente de correlación de Spearman.

La variable climática con menor nivel de relación ($|-0.41| \geq r \leq 0.30$, $0.02 \geq R^2 \leq 0.17$) con la HMJE fue la temperatura máxima. Sin embargo, Gauhl (1994) para el patosistema *M. fijiensis* – *Musa* sp. AAB cv Curraré, en plantaciones mal drenadas, halló correlaciones significativas ($0.71 \geq r \leq 0.75$, valor $p < 0.05$) y medianamente significativas ($0.75 \geq r \leq 0.77$, valor $p < 0.01$) con mayor nivel de asociación, entre la temperatura máxima y diferentes estados de la enfermedad y áreas de la hoja con síntomas, y, para el patosistema *M. fijiensis* – *Musa* sp. AAA subgrupo Cavendish, cv Valery, encontró una correlación altamente significativa ($r = 0.54$, valor $p < 0.001$) y medianamente significativas ($0.42 \geq r \leq 0.50$, valor $p < 0.01$) entre la HMJE y el valor rezagado de la temperatura máxima entre cero a siete semanas. Las demás variables, temperatura mínima y media, humedad relativa, brillo solar promedio y acumulado se ubican en un nivel intermedio de asociación, respecto a las dos variables anteriores, entre el progreso de la enfermedad en la planta y la variable en cuestión.

Figura 3-2: Dinámica temporal de la HMJE y de la precipitación en la región bananera de Urabá antioqueño.



La temperatura mínima, cuando el rezago fue inferior a 27 días, presentó una relación directa ($(0.48 \geq r \leq 0.59, 0.23 \geq R^2 \leq 0.35)$) con la HMJE y, cuando el rezago fue superior a los 100 días, presentó una asociación inversa ($(|-0.46| \geq r \leq |-0.54|, 0.29 \geq R^2 \leq 0.59)$), similar a lo hallado por Gauhl (1994) para el patosistema *M. fijiensis* – *Musa* sp. AAA subgrupo Cavendish, cv Valery, quién identificó una relación positiva y una correlación significativa ($r = 0.32$, valor $p < 0.05$) entre la HMJE y la temperatura mínima de la misma semana y, una asociación inversa y una correlación medianamente significativa ($(|-0.47| \geq r \leq |-0.49|$, valor $p < 0.01$) entre la HMJE y el valor rezagado de la temperatura mínima entre siete y ocho semanas.

44 Desarrollo de modelos predictivos de Sigatoka negra (*Mycosphaerella fijiensis* M. Morelet) en banano para la región de Urabá, Antioquia – Colombia

Tabla 3-1: Intervalos y rezagos de las variables climáticas diarias, con mayores coeficientes de correlación de Pearson (r) respecto a la variable biológica hoja más joven enferma (HMJE).

Finca	Intervalo/rezago (días)	Precipitación	Temperatura mínima	Temperatura media	Temperatura máxima	Humedad Relativa	Brillo solar promedio
A	Intervalo	97	120	58	120	120	40 ⁽¹⁾ , 41
	Rezago	38	100	104	150	150	87
	r ⁽²⁾	-0.65	-0.46	-0.30	0.19	0.40	0.44
	R ²⁽³⁾	0.42	0.21	0.09	0.04	0.16	0.19
G	Intervalo	106	120	103	44	47	86, 87 ⁽¹⁾
	Rezago	38	122	103	102	54	83
	r ⁽²⁾	-0.73	-0.54	-0.46	-0.29	-0.38	0.42
	R ²⁽³⁾	0.53	0.29	0.21	0.08	0.14	0.18
B	Intervalo	67	85	120	57	62	119, 120 ⁽¹⁾
	Rezago	59	1	112	110	33	66 ⁽¹⁾ , 67
	r ⁽²⁾	-0.54	0.59	-0.47	-0.41	-0.47	0.59
	R ²⁽³⁾	0.29	0.35	0.22	0.17	0.22	0.35
E	Intervalo	58	94	120	22	53	62
	Rezago	67	1	121	1	40	89
	r ⁽²⁾	-0.50	0.49	-0.40	0.30	-0.31	0.38
	R ²⁽³⁾	0.25	0.24	0.16	0.09	0.10	0.14
H	Intervalo	95	89	49	51	56	88
	Rezago	58	9	142	142	62	77
	r ⁽²⁾	-0.63	0.50	-0.45	-0.30	-0.53	0.59
	R ²⁽³⁾	0.40	0.25	0.20	0.09	0.28	0.35
C	Intervalo	99	100	95	40	71	71
	Rezago	53	10	14	147	60	94
	r ⁽²⁾	-0.58	0.52	0.45	-0.23	-0.66	0.58
	R ²⁽³⁾	0.34	0.27	0.2	0.05	0.44	0.34
D	Intervalo	93	100	94	33	47	60 ⁽¹⁾ , 61
	Rezago	52	12	21	92	70	94
	r ⁽²⁾	-0.52	0.48	0.36	0.14	-0.46	0.45
	R ²⁽³⁾	0.27	0.23	0.13	0.02	0.21	0.20
F	Intervalo	88	84	120	53	48	72 ⁽¹⁾ , 73
	Rezago	55	27	136	130	74	94
	r ⁽²⁾	-0.53	0.49	-0.44	-0.39	-0.41	0.45
	R ²⁽³⁾	0.28	0.24	0.19	0.15	0.17	0.20
I	Intervalo	82	120	120	53	78	81 ⁽¹⁾ , 82
	Rezago	68	150	142	142	54	90
	r ⁽²⁾	-0.67	-0.54	-0.52	-0.37	-0.58	0.62
	R ²⁽³⁾	0.45	0.29	0.27	0.14	0.34	0.38
J	Intervalo	120	120	120	58	49	120
	Rezago	53	143	135	116	67	94
	r ⁽²⁾	-0.77	-0.59	-0.48	-0.26	-0.69	0.67
	R ²⁽³⁾	0.59	0.35	0.23	0.07	0.48	0.45

⁽¹⁾Brillo solar acumulado. ⁽²⁾Coefficiente de correlación de Pearson con significancia < 0.05.

⁽³⁾Coefficiente de determinación.

Como lo afirman Hernández et al (2005) el comportamiento de la enfermedad estuvo sujeto a una dinámica que dependió de las condiciones ambientales, la cual mostró diferentes fases de desarrollo. Además, la dirección de la relación presentada por cada una de estas variables, positiva o negativa, depende de la finca, mostrando probablemente la interacción de estas con las características del suelo y de manejo de la finca, lo que constituye un microclima, que en algunos casos favorece, mientras que otros no, el desarrollo de la enfermedad. En sentido, pareciera ser más adecuado la elaboración de modelos predictivos específicos a cada finca, y no generales para la región.

Cuando las variables climáticas presentan una resolución semanal (Tabla 3-2), respecto a cuándo su resolución es diaria, su asociación con el nivel de enfermedad disminuyó, con diferencias considerables, en el tiempo de acumulación y de rezago, que, dependiendo de la variable, las diferencias pueden ser mayores a una semana. No obstante, la variable precipitación sigue siendo una de las variables más fuertemente relacionada con el nivel de enfermedad ($|-0.31| \geq r \leq |-0.60|$, $0.10 \geq R^2 \leq 0.36$), las demás variables presentan una asociación semejante, media o baja. Por ejemplo: La humedad relativa mínima, media y máxima, en general, presentaron una asociación inversa con la HMJE ($|-0.20| \geq r \leq |-0.69|$, $0.04 \geq R^2 \leq 0.48$); diferente a la identificada por Hernández *et al* (2005) entre el Promedio Ponderado de Infección (PPI) y la humedad relativa acumulada siete semanas ($r = 0.48$), y; Smith *et al* (1997) entre el período libre de síntomas, que corresponde al número de días entre la apertura total de la hoja y el momento en que se observan síntomas en esta, y el valor medio de horas diarias con una humedad relativa del 100% durante la semana posterior a la emergencia de la hoja, $r = -0.58$.

Como en el caso anterior la direccionalidad de la relación depende de la finca, las diferencias, en la magnitud de las asociaciones, así como, en los tiempos de acumulación y de rezago, dependientes de si la resolución de estas es diaria o semanal, refuerzan la idea de desarrollar modelos predictivos para variables climáticas con resolución diaria.

46 Desarrollo de modelos predictivos de Sigatoka negra (*Mycosphaerella fijiensis* M. Morelet) en banano para la región de Urabá, Antioquia – Colombia

Tabla 3-2: Intervalos y rezagos de las variables climáticas semanales, con mayores coeficientes de correlación de Pearson (r) respecto a la variable biológica Hoja Más Joven Enferma (HMJE).

Finca	Intervalo/rezago (semanas)	PP ⁽¹⁾	Tmin ⁽²⁾	Tmed ⁽³⁾	Tmax ⁽⁴⁾	HRmin ⁽⁵⁾	HRmed ⁽⁶⁾	HRmax ⁽⁷⁾	Bmin ⁽⁸⁾	Bmed ⁽⁹⁾	Bmax ⁽¹⁰⁾
A	Intervalo	10	10	10	8	6	4	3	7	7	1
	Rezago	8	12	12	0	6	8	12	12	12	0
	r ⁽¹¹⁾	-0.60	-0.35	-0.26	0.44	-0.32	-0.32	-0.28	0.24	0.44	-0.19
	R ²⁽¹²⁾	0.36	0.12	0.07	0.19	0.10	0.10	0.08	0.06	0.19	0.04
G	Intervalo	10	10	10	8	9	7	7	7	7	1
	Rezago	9	11	12	0	6	8	0	12	0	0
	r ⁽¹¹⁾	-0.56	-0.46	-0.37	0.29	-0.37	-0.38	0.32	0.20	-0.45	-0.18
	R ²⁽¹²⁾	0.31	0.21	0.14	0.08	0.14	0.14	0.10	0.04	0.20	0.03
B	Intervalo	10	1	8	7	4	9	1	10	10	10
	Rezago	10	5	0	0	7	5	12	12	12	2
	r ⁽¹¹⁾	-0.53	0.19	0.34	0.31	-0.39	-0.47	-0.30	0.41	0.58	0.34
	R ²⁽¹²⁾	0.28	0.04	0.12	0.10	0.15	0.22	0.09	0.17	0.34	0.12
E	Intervalo	10	10	5	5	6	8	1	9	10	10
	Rezago	8	12	0	0	6	6	12	12	12	3
	r ⁽¹¹⁾	-0.49	-0.19	0.44	0.52	-0.33	-0.31	-0.20	0.25	0.37	0.31
	R ²⁽¹²⁾	0.24	0.04	0.19	0.27	0.11	0.10	0.04	0.06	0.14	0.10
H	Intervalo	10	10	8	10	1	7	5	3	10	10
	Rezago	10	0	5	12	11	10	12	12	12	4
	r ⁽¹¹⁾	-0.56	0.31	0.35	-0.20	-0.34	-0.52	-0.34	0.26	0.58	0.43
	R ²⁽¹²⁾	0.31	0.10	0.12	0.04	0.12	0.27	0.12	0.07	0.34	0.18
C	Intervalo	10	7	10	4	10	10	5	10	10	10
	Rezago	9	7	4	5	5	9	12	12	12	5
	r ⁽¹¹⁾	-0.56	0.26	0.44	0.34	-0.48	-0.65	-0.31	0.36	0.54	0.35
	R ²⁽¹²⁾	0.31	0.07	0.19	0.12	0.23	0.42	0.10	0.13	0.29	0.12
D	Intervalo	10	10	10	3	5	7	5	2	10	10
	Rezago	10	5	6	3	11	10	12	2	12	3
	r ⁽¹¹⁾	-0.31	0.32	0.34	0.11	-0.31	-0.46	-0.27	-0.19	0.42	0.34
	R ²⁽¹²⁾	0.10	0.10	0.12	0.01	0.10	0.21	0.07	0.04	0.18	0.12
F	Intervalo	10	10	10	10	1	7	5	10	10	10
	Rezago	9	6	6	12	12	10	12	12	12	6
	r ⁽¹¹⁾	-0.54	0.40	0.26	-0.22	-0.26	-0.42	-0.30	0.21	0.41	0.33
	R ²⁽¹²⁾	0.29	0.16	0.07	0.05	0.07	0.18	0.09	0.04	0.17	0.11
I	Intervalo	10	9	9	3	2	10	5	2	10	10
	Rezago	10	6	5	0	12	9	12	12	12	5
	r ⁽¹¹⁾	-0.57	0.27	0.23	0.15	-0.38	-0.58	-0.27	0.19	0.57	0.40
	R ²⁽¹²⁾	0.32	0.07	0.05	0.02	0.14	0.34	0.07	0.04	0.32	0.16
J	Intervalo	10	8	10	10	10	7	3	3	10	10
	Rezago	10	4	4	12	7	10	12	12	12	4
	r ⁽¹¹⁾	-0.52	0.40	0.33	-0.18	-0.45	-0.69	-0.43	0.24	0.59	0.45
	R ²⁽¹²⁾	0.27	0.16	0.11	0.03	0.20	0.48	0.18	0.06	0.35	0.20

⁽¹⁾Precipitación. ⁽²⁾Temperatura mínima. ⁽³⁾Temperatura media. ⁽⁴⁾Temperatura máxima. ⁽⁵⁾Humedad relativa mínima. ⁽⁶⁾Humedad relativa media. ⁽⁷⁾Humedad relativa máxima. ⁽⁸⁾Brillo solar mínimo. ⁽⁹⁾Brillo solar medio / acumulado. ⁽¹⁰⁾Brillo solar máximo. ⁽¹¹⁾Coefficiente de correlación de Pearson con significancia < 0.05. ⁽¹²⁾Coefficiente de determinación.

Hoss *et al*, (2000) afirman que, el establecimiento del patógeno sobre cultivares susceptibles se inicia a través de la penetración estomatal y la colonización intercelular bajo una relación biotrófica en un período de tres a cuatro semanas. Marín *et al* (2003) aseveran que posterior a la penetración, la hifa coloniza células adyacentes durante aproximadamente siete días sin ninguna evidencia de daño celular, lo que dificulta identificar oportunamente estados tempranos del desarrollo de la enfermedad en campo y más aún en plantaciones adultas. Así, según lo encontrado por Gauhl (1994) quien identificó que el desarrollo de la enfermedad es más rápido previo a la floración que después de esta, al hallar, por ejemplo, que los primeros síntomas (estados uno y dos, acorde a los estados de evolución de la enfermedad (EE) descritos por Fouré y Ganry (2008)), se desarrollaron con una semana de anticipación en plantas que no habían florecido en comparación con plantas que ya habían emitido su inflorescencia, es posible dar explicación a los mayores rezagos y períodos de las variables climáticas acumuladas o promediadas respecto a la fecha de evaluación de la HMJE en comparación con otras investigaciones, ya que para este trabajo la metodología de evaluación de la dinámica de la enfermedad se realizó sobre plantas florecidas. Además, el autor, afirma que los síntomas posteriores (estados tres en adelante, acorde a los estados de evolución de la enfermedad descritos por Fouré y Ganry (2008)), se observan en el tercio medio e inferior de la hoja un mes después en comparación con el tercio superior y, a medida que las plantas son más viejas, aumenta este intervalo, lo que sumado a la práctica de despuntar las hojas en las plantaciones comerciales, implicaría una detección tardía con la metodología empleada para el seguimiento del avance de la enfermedad.

3.3.2 Modelos predictivos para la Hoja Más Joven Enferma

Los modelos más simples predictivos de la HMJE en función del mejor período de acumulación o promediado, de máximo o mínimo y rezago de las variables climáticas según su naturaleza, para cada finca, fueron obtenidos considerando tanto, solo el efecto aditivo de las variables climáticas (Tabla 3-3 y Tabla 3-5), como con la interacción de estas (Tabla 3-4 y Tabla 3-6), mediante la metodología de selección de variables Backward Stepwise, con mayor coeficiente de determinación ajustado (R^2) y menor error cuadrado medio de predicción (ECM). No obstante, todos los modelos fueron altamente significativos

(Valor $p < 0.001$), solo los residuales de los modelos construidos a partir de las variables climáticas semanales se ajustaron a una distribución normal (Test Shapiro-Wilk, Valor $p > 0.01$) para las fincas: A, G, F e I, cuando no se consideraron la interacción de las variables climáticas (Tabla 3-5) y, A, B, E, F, I y J, cuando se consideró la interacción de las variables climáticas (Tabla 3-6).

De manera general, se encontraron modelos con mayor capacidad predictiva en cada una de las fincas, cuando estos consideraron la interacción de las variables climáticas ($0.63 \geq R^2 \leq 0.84$, $0.54 \pm 0.01 \geq ECM \leq 0.98 \pm 0.02$), respecto a cuándo solo se tuvo en cuenta el efecto aditivo de estas ($0.46 \geq R^2 \leq 0.72$, $0.67 \pm 0.01 \geq ECM \leq 1.10 \pm 0.01$). Para las variables con resolución diaria: En los modelos aditivos (Tabla 3-3), cinco variables (precipitación, temperatura media y máxima, ENSO en su condición de niño y normal) fueron consistentes, en los modelos ajustados para todas las fincas. Las demás variables, fueron importantes dependiendo de la finca. Cuando se consideró, en los modelos, la interacción de las variables climáticas (Tabla 3-4), se configuró una nueva estructura de relación, con mayor nivel de explicación del nivel de enfermedad. En este caso, las variables más consistentes en todos los modelos fueron, la temperatura máxima y la humedad relativa, las demás fueron importantes dependiendo de la finca. En cuanto a las interacciones, se evidencia una gran importancia de la interacción de la precipitación con respecto a las demás variables, más que su efecto individual.

Para las variables con resolución semanal: En los modelos aditivos (Tabla 3-5), solo dos variables (precipitación y ENSO en su condición de normal) fueron consistentes, en los modelos ajustados para todas las fincas. Las demás variables, fueron importantes dependiendo de la finca. El brillo solar mínimo y el brillo solar máximo, por ejemplo, solo fueron incluidos en los modelos de tres fincas. Cuando se consideró, en los modelos, la interacción de las variables climáticas (Tabla 3-6), se modificó la estructura de relación, a una con mayor nivel de explicación del nivel de enfermedad. En este caso, las variables más consistentes en todos los modelos fueron, la temperatura máxima, y el ENSO en su condición de niño y normal en nueve de 10 fincas, las demás fueron importantes dependiendo de la finca.

La configuración de variables e interacción entre estas, particular a cada finca, refuerza la propuesta de modelos específicos, más que un modelo general para la región.

Para el patosistema *M. fijiensis* – *Musa* AAB cv Hartón, Hernández *et al* (2005) encontraron que el método más adecuado para determinar la ecuación de regresión que explicó el comportamiento de la enfermedad, resultó ser aquel donde consideraron los valores acumulados consecutivos por semanas de las variables precipitación, humedad relativa, temperatura máxima y mínima, evaporación y nubosidad, sin embargo, solo lograron explicar el 33.32% del comportamiento de la enfermedad por los valores acumulados durante seis semanas consecutivas de las variables nubosidad, temperatura mínima, humedad relativa y evaporación, previos a la evaluación de la enfermedad en campo. Hernández *et al.* (2009) para el mismo patosistema, obtuvieron un modelo que permitió pronosticar el comportamiento de la severidad de la enfermedad con un coeficiente de determinación ajustado (R^2) de 0.67 (valor $p < 0.01$), a partir de los valores acumulados durante seis semanas consecutivas de las variables nubosidad e insolación y previas de la evaluación de la enfermedad.

En comparación con el modelo generado por Freitez *et al* (2009) para una variable biológica similar, la hoja más joven manchada y, sin discriminación para la época del año, para el patosistema *M. fijiensis* – *Musa* AAB cv Hartón, los modelos en este trabajo desarrollados, predicen la HMJE a partir de un número mayor de variables climáticas y con menor coeficiente de determinación ajustado (R^2) cuando no se consideran la interacción de las mismas (Tabla 3-3 y Tabla 3-5), ya que a partir de la humedad relativa y la radiación solar el coeficiente de determinación ajustado (R^2) del modelo desarrollado por Freitez *et al* (2009) fue de 0.71. Solo para el modelo de la finca J, el coeficiente de determinación ajustado (R^2) es mayor, 0.72 (Tabla 3-3) que el reportado por Freitez *et al.* (2009), para el cual, todos los parámetros del modelo son altamente significativos (valor $p < 0.001$) y solo no se incluyó el brillo solar promedio como variable predictora.

Como afirman Hernández *et al* (2005) el hecho de tomar como referencia, los datos climatológicos registrados por una estación meteorológica distante de la zona de estudio, podría haber influido en el coeficiente de determinación ajustado (R^2) obtenido; por ejemplo, los modelos de las fincas B, G, A y E, situadas a una distancia de 0.92, 4.30, 8.39

y 9.89 km de la estación Tulenapa, respectivamente, presentaron coeficientes de determinación ajustados (R^2) que fueron disminuyendo a medida que las fincas se encontraban más distantes de la estación, 0.61, 0.58, 0.56 y 0.50 (Tabla 3-3), respectivamente, no obstante, este patrón no es una regla, ya que para las fincas H, D y C, ubicadas a 4.37, 7.10 y 17.70 km de la estación Uniban, respectivamente, el coeficiente de determinación ajustado (R^2) para los modelos cuando para las variables climáticas semanales y se considera la interacción de las mismas, fue mayor para la finca C, 0.81 (Tabla 3-6) y menor para la finca H y D, 0.78 y 0.76, respectivamente, lo que implicaría, que el porcentaje restante de variación por explicar, podría ser atribuido a otros factores no estudiados en este trabajo, como concluyen Hernández et al. (2005).

“Los resultados obtenidos en la presente investigación, se basaron en considerar que las 10 fincas analizadas, al pertenecer a una misma compañía y depender de una misma área técnica, adoptan tecnología y poseen infraestructura similar... Esto no es del todo cierto pues a nivel de finca, sin embargo, existe cierta autonomía en las decisiones que se toman respecto al cultivo. Así mismo, las propiedades de los suelos repercuten en el cultivo y en la relación con las variables climáticas.” (Guarín, 2011).

Tabla 3-3: Parámetros de los modelos predictivos (valor $p < 0.001$) del nivel de enfermedad de Sigatoka negra, hoja más joven enferma (HMJE), en función del efecto aditivo de las variables climáticas diarias, con el periodo de acumulación o promedio y rezago más relacionados, con esta, para cada una de las fincas, de la región de Urabá, Colombia

Finca	Parámetros										R^2 ⁽¹¹⁾	Shapiro-W. ⁽¹²⁾	ECM ($X \pm S$) ⁽¹³⁾
	β_0 ⁽¹⁾	X1 ⁽²⁾	X2 ⁽³⁾	X3 ⁽⁴⁾	X4 ⁽⁵⁾	X5 ⁽⁶⁾	X6 ⁽⁷⁾	X7 ⁽⁸⁾	X8 ⁽⁹⁾	X9 ⁽¹⁰⁾			
A	-27.67	-2.7E-03	0.98	-0.60	0.43	0.19	0.02	-0.55 ⁽¹⁴⁾	-0.15 ⁽¹⁴⁾	0.33	0.56	< 2.0E-05	0.94 ± 0.002
G	25.73	-2.1E-03	-	-0.85	0.21	-	-7.8E-04 ⁽¹⁴⁾	-	-0.26	0.16	0.58	< 2.2E-16	0.68 ± 0.001
B	-15.07	-1.4E-03	2.54	-0.96	-0.41	-	5.2E-03	-	-0.90	-0.91	0.61	< 3.2E-15	0.92 ± 0.001
E	-6.32 ⁽¹⁴⁾	-1.3E-03	0.85	-1.00	0.81	-0.05	3.0E-03 ⁽¹⁴⁾	-	-0.99	-0.53	0.50	< 6.8E-13	0.82 ± 0.001
H	-3.55 ⁽¹⁴⁾	-1.3E-03	1.00	0.53	-0.78	-0.03	6.0E-03	-	-0.72	-1.01	0.59	< 1.3E-12	0.70 ± 0.001
C	-3.63 ⁽¹⁴⁾	-2.5E-04	-	1.68	-0.51	-0.24	0.01	-	-0.40	-0.70	0.56	< 4.8E-15	0.90 ± 0.001
D	-27.83	-1.3E-03	1.70	-0.28	0.53	-0.12	-	-	-1.83	-1.81	0.66	< 2.1E-09	0.73 ± 0.001
F	23.17	-9.4E-04	1.60	-0.48	-0.91	-0.10	-	-	-1.67	-1.56	0.64	< 6.4E-09	0.83 ± 0.001
I	55.96	-1.7E-03	-0.90	0.86	-1.11	-0.18	-	0.34	-0.46	-0.36	0.59	< 2.1E-10	0.91 ± 0.001
J	46.54	-2.2E-03	-0.67	0.63	-0.60	-0.23	2.6E-03	-	-0.73	-0.64	0.72	< 3.1E-10	0.78 ± 0.001

⁽¹⁾ Intercepto. ⁽²⁾ Precipitación. ⁽³⁾ Temperatura mínima. ⁽⁴⁾ Temperatura media. ⁽⁵⁾ Temperatura máxima. ⁽⁶⁾ Humedad relativa. ⁽⁷⁾

Brillo solar acumulado. ⁽⁸⁾ Brillo solar promedio. ⁽⁹⁾ ENSO, condición niño. ⁽¹⁰⁾ ENSO, condición normal. ⁽¹¹⁾ Coeficiente de determinación ajustado. ⁽¹²⁾ Test Shapiro-Wilk. ⁽¹³⁾ Error Cuadrado Medio de predicción. ⁽¹⁴⁾ Variable no significativa en el modelo, Valor $p \geq 0.05$.

Tabla 3-4: Parámetros de los modelos predictivos (valor $p < 0.001$) del nivel de enfermedad de Sigatoka negra, hoja más joven enferma (HMJE), en función del efecto aditivo e interactivo de las variables climáticas diarias, con el periodo de acumulación o promedio y rezago más relacionados, con esta, para cada una de las fincas, de la región de Urabá, Colombia.

F. ⁽¹⁾	Parámetros																									R ²⁽¹²⁾	Shapiro-W. ⁽¹³⁾	ECM ($X \pm S$) ⁽¹⁴⁾		
	$\beta_0^{(2)}$	X1 ⁽³⁾	X2 ⁽⁴⁾	X3 ⁽⁵⁾	X4 ⁽⁶⁾	X5 ⁽⁷⁾	X6 ⁽⁸⁾	X7 ⁽⁹⁾	X8 ⁽¹⁰⁾	X9 ⁽¹¹⁾	X1:X2	X1:X3	X1:X4	X1:X5	X1:X6	X1:X7	X2:X5	X2:X6	X2:X7	X3:X5	X3:X6	X3:X7	X4:X5	X4:X6	X4:X7				X5:X6	X5:X7
A	-1905.0	-0.1	42.4	-	31.7	20.3	-	24.0	-0.4	-0.3	5.7E-03	-	-3.1E-03	3.3E-04	-	-8.9E-04	-0.5	-	-	-0.1	0.03	-	-0.2	-0.04	-0.8	4.3E-03	-	0.74	3.8E-11	0.72 ± 0.002
G	928.8	-0.1	-15.3	-7.9	-12.8	-7.7	-0.2	-	-	-	7.4E-03	-5.5E-03	2.4E-03	-2.8E-04	-1.2E-05	-	0.2	-0.04	1.7	-	0.03	-	0.1	-	-	4.5E-03	-0.5	0.67	1.2E-11	0.61 ± 0.002
B	3732.0	-	-	-88.9	-36.0	-34.1	-3.3	226.3	-0.8	-0.5	-3.3E-03	-7.4E-03	8.0E-03	3.0E-04	-8.2E-05	1.1E-02	-0.1	0.02	-	1.0	-	-	0.2	0.1	-8.4	-	0.3	0.80	1.9E-06	0.66 ± 0.002
E	963.7	-0.2	8.1 ₍₁₅₎	-53.8	12.9	-6.4	-1.2	-	-1.1	-0.5	-1.1E-03 ₍₁₅₎	8.4E-03	-	1.2E-04	-5.6E-06 ₍₁₅₎	-	-0.1	0.01	-	0.5	0.02	-	-0.1	-	-	2.6E-03	-	0.64	3.0E-11	0.69 ± 0.002
H	836.3	0.02	-8.2	-42.9	15.7	-8.1	-0.3	-	-0.5	-0.6	1.2E-03	1.1E-03	-2.4E-03	-	-1.5E-05	-	0.1 ₍₁₅₎	0.01	-	0.4	0.03	-	-0.1 ₍₁₅₎	-0.02	-	-1.1E-03	-	0.71	1.2E-12	0.59 ± 0.002
C	-745.6	0.2	-	79.1	-48.7	7.6	-	-	-0.4	-0.6	1.7E-03	-6.0E-03	5.6E-04	-1.2E-03	-2.1E-05	-	-	-0.01	-	-0.8	-	-	0.5	0.01	-	1.3E-03	-	0.68	2.4E-11	0.77 ± 0.002
D	-615.2	-	26.4	-19.0 ₍₁₅₎	15.8	6.5	0.2	-	-1.7	-1.5	-1.2E-03	1.3E-03	-	-8.5E-05	-6.2E-06	-	-0.2	-0.1	3.6	0.2 ₍₁₅₎	0.10	-6.6	-0.2	-0.03 ₍₁₅₎	2.9	-	-0.1	0.78	6.8E-10	0.59 ± 0.002
F	-1121.0	-	28.8	3.0	11.2	11.5	0.6	-	-1.6	-1.2	1.4E-03	1.9E-03	-3.2E-03	1.6E-04	4.0E-06 ₍₁₅₎	-	-0.3	-0.01	-	-	-	-1.3	-0.1	0.01	-	-7.4E-03	0.4	0.73	2.4E-08	0.73 ± 0.002
I	1791.0	0.03 ₍₁₅₎	-49.9	85.1	-89.7	-19.3	-0.6	1.7	-0.6	-0.5	-2.4E-03	-	1.5E-03	-1.6E-04 ₍₁₅₎	-	-2.4E-03	0.54	0.01	-	-0.8	-0.04	-	0.9	0.04	-	4.2E-03	-	0.65	2.9E-11	0.85 ± 0.002
I	-488.4	-0.1	23.9	-13.3	7.9	10.1	-0.5	-	-0.8	-0.6	2.7E-03	-	-	-	-6.2E-06	-	-0.3	-0.01	-	-	0.03	-	-0.1	-	-	-1.5E-03	-	0.78	2.1E-15	0.70 ± 0.002

(1)Finca. (2)Intercepto. (3)Precipitación. (4)Temperatura mínima. (5)Temperatura media. (6)Temperatura máxima. (7)Humedad relativa. (8)Brillo solar acumulado. (9)Brillo solar promedio. (10)ENSO, condición niño. (11)ENSO, condición normal. (12)Coeficiente de determinación ajustado. (13)Test Shapiro-Wilk. (14)Error Cuadrado Medio de predicción. (15)Variable no significativa en el modelo, valor $p \geq 0.05$.

Tabla 3-5: Parámetros de los modelos predictivos (valor $p < 0.001$) del nivel de enfermedad de Sigatoka negra, hoja más joven enferma (HMJE), en función del efecto aditivo de las variables climáticas semanales, con el periodo de acumulación o promedio y rezago más relacionados, con esta, para cada una de las fincas, de la región de Urabá, Colombia.

F. ⁽¹⁾	Parámetros														R ² ⁽¹⁶⁾	Shapiro-W. ⁽¹⁷⁾	ECM (X ± S) ⁽¹⁸⁾
	β_0 ⁽²⁾	X1 ⁽³⁾	X2 ⁽⁴⁾	X3 ⁽⁵⁾	X4 ⁽⁶⁾	X5 ⁽⁷⁾	X6 ⁽⁸⁾	X7 ⁽⁹⁾	X8 ⁽¹⁰⁾	X9 ⁽¹¹⁾	X10 ⁽¹²⁾	X11 ⁽¹³⁾	X12 ⁽¹⁴⁾	X13 ⁽¹⁵⁾			
A	13.55 ⁽¹⁹⁾	-1.74E-03	-0.50	-1.14	0.86	-0.08	-	0.15	-0.29	-	14.68	-	-0.45	-0.94	0.68	1.46E-01	0.85 ± 0.02
G	33.66	-8.35E-04	-0.14 ⁽¹⁹⁾	-1.08	-	-0.07	-	0.14	-0.19	-	7.53	-	-	-0.25	0.51	2.34E-01	0.80 ± 0.01
B	-23.24	-1.76E-03	0.17	0.47	0.47	-	-0.12	-	-	0.82 ⁽¹⁹⁾	0.83	0.68	-0.87	-1.10	0.66	2.65E-04	0.90 ± 0.01
E	-8.04 ⁽¹⁹⁾	-8.33E-04	0.13 ⁽¹⁹⁾	-0.72	0.88	-0.03 ⁽¹⁹⁾	-	-	0.01	-	-	0.32	-0.55	-0.44	0.56	1.65E-04	0.90 ± 0.01
H	-6.12 ⁽¹⁹⁾	-1.45E-03	-	0.92	-0.13	-	-0.18	0.09	-	-	0.43	-	-1.35	-1.40	0.66	1.97E-07	0.67 ± 0.01
C	26.65	8.34E-03	0.13 ⁽¹⁹⁾	-	0.25	-0.07	-0.31	-	-	7.02	-	-	-0.49	-0.67	0.57	4.58E-04	0.97 ± 0.06
D	-12.45	-1.61E-03	0.30	0.75	0.16	-0.15	-	0.04 ⁽¹⁹⁾	-0.18	-	12.93	-0.28	-2.50	-1.96	0.63	1.62E-03	0.78 ± 0.01
F	10.01 ⁽¹⁹⁾	-3.04E-03	0.47	-	0.16	-0.03 ⁽¹⁹⁾	-0.18	0.04 ⁽¹⁹⁾	-0.12 ⁽¹⁹⁾	2.85	8.30 ⁽¹⁹⁾	-	-2.27	-2.26	0.70	8.08E-01	0.80 ± 0.02
I	12.40 ⁽¹⁹⁾	-1.87E-03	0.14 ⁽¹⁹⁾	0.49	-0.12 ⁽¹⁹⁾	-	-0.20	-	0.01	-	-	-	-0.79	-0.45 ⁽¹⁹⁾	0.46	1.14E-02	1.10 ± 0.01
J	36.25	-2.28E-03	0.26	0.49	-0.28	-	-0.46	0.04 ⁽¹⁹⁾	-	-	-	-	-1.36	-0.74	0.69	4.21E-04	0.87 ± 0.01

(1) Finca. (2) Intercepto. (3) Precipitación. (4) Temperatura mínima. (5) Temperatura media. (6) Temperatura máxima. (7) Humedad relativa mínima. (8) Humedad relativa promedio. (9) Humedad relativa máxima. (10) Brillo solar acumulado. (11) Brillo solar mínimo. (12) Brillo solar promedio. (13) Brillo solar máximo. (14) ENSO, condición niño. (15) ENSO, condición normal. (16) Coeficiente de determinación ajustado. (17) Test Shapiro-Wilk. (18) Error Cuadrado Medio de predicción. (19) Variable no significativa en el modelo, valor $p \geq 0.05$.

Tabla 3-6: Parámetros de los modelos predictivos (valor $p < 0.001$) del nivel de enfermedad de Sigatoka negra, hoja más joven enferma (HMJE), en función del efecto aditivo e interactivo de las variables climáticas semanales, con el periodo de acumulación o promedio y rezago más relacionados, con esta, para cada una de las fincas, de la región de Urabá, Colombia.

F. ⁽¹⁾	Parámetros																									R ²⁽¹⁶⁾	Shapiro-W. ⁽¹⁷⁾	ECM (X ± S) ⁽¹⁸⁾							
	β ₀ ⁽²⁾	X1 ⁽³⁾	X2 ⁽⁴⁾	X3 ⁽⁵⁾	X4 ⁽⁶⁾	X5 ⁽⁷⁾	X6 ⁽⁸⁾	X7 ⁽⁹⁾	X8 ⁽¹⁰⁾	X9 ⁽¹¹⁾	X10 ⁽¹²⁾	X11 ⁽¹³⁾	X12 ⁽¹⁴⁾	X13 ⁽¹⁵⁾	X1:X2	X1:X3	X1:X4	X1:X5	X1:X6	X1:X7	X1:X8	X1:X9	X1:X10	X1:X11	X2:X5				X2:X6	X2:X7	X2:X8	X2:X9			
		X2:X10	X2:X11	X3:X5	X3:X62	X3:X7	X3:X8	X3:X9	X3:X10	X3:X11	X4:X5	X4:X6	X4:X7	X4:X8	X4:X9	X4:X10	X4:X11	X5:X8	X5:X9	X5:X10	X5:X11	X6:X8	X6:X9	X6:X10	X6:X11				X7:X8	X7:X9	X7:X10	X7:X11			
A	499.6 ⁽¹⁹⁾	-0.1	14.7	-59.6	23.4	-9.9	6.0	-	-52.0	-	2525.0	-	-0.2 ⁽¹⁹⁾	-0.7	-	2.2E-03 ⁽¹⁹⁾	1.1E-03	4.5E-04	-6.8E-04	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.77	4.9E-02	0.79 ± 0.02
G	207.6 ⁽¹⁹⁾	0.1	17.5	-	-15.0	13.1	-12.8	-	-	-37.4	-40.3	-	-0.4	-0.4	1.1E-03	-3.8E-03	-	-	-	-	-	-	0.1 ⁽¹⁹⁾	-	-	-0.1	-0.1 ⁽¹⁹⁾	-	-	-	-	0.69	4.57E-05	0.68 ± 0.03	
B	-218.4 ⁽¹⁹⁾	3.2E-02	-	-	6.8 ⁽¹⁹⁾	-3.4	8.2	-1.3 ⁽¹⁹⁾	0.4	-346.7	-	-23.4	-0.9	-1.1	-1.5E-03	-	-	-	-	2.2E-04	-4.3E-05	-	-	-6.8E-04 ⁽¹⁹⁾	4.0E-02 ⁽¹⁹⁾	-0.1 ⁽¹⁹⁾	-	-3.3E-03 ⁽¹⁹⁾	2.3 ⁽¹⁹⁾	-	-	0.84	3.17E-02	0.78 ± 0.11	
E	-849.7	-0.2	-	-	24.3	-4.5	13.5	-	-	-	-	-15.4 ⁽¹⁹⁾	-0.6	-0.3	-6.7E-04	8.3E-03	-	-	-3.0E-04	-	-1.6E-03	-	0.1	-5.2E-04 ⁽¹⁹⁾	-2.7E-02	-	-	-	-	-	-	0.83	2.50E-02	0.54 ± 0.01	
H	1060.0	-0.1	7.2	-54.1	6.5 ⁽¹⁹⁾	-1.1 ⁽¹⁹⁾	-6.3	-7.8	-25.9	-	1791.0	59.0	-1.2	-1.6	-	-1.7E-03 ⁽¹⁹⁾	-	-	5.3E-04	8.5E-04	9.5E-04	-	-0.1	1.3E-03	2.2E-02 ⁽¹⁹⁾	-0.1	-	-	-	0.2	-	0.78	1.29E-03	0.59 ± 0.02	
C	-827.9	0.2	-	-	24.8	11.1	-	1.3	1.3	3816.0	-	-68.1	0.3	-	-	-4.0E-03	-	-5.9E-04	-	-	1.1E-03 ⁽¹⁹⁾	0.1 ⁽¹⁹⁾	-0.1 ⁽¹⁹⁾	-	-	-2.0E-02	-	0.3 ⁽¹⁹⁾	-	-	-	0.81	2.19E-03	0.75 ± 0.32	
D	870.0	-	22.8	-49.3	7.8	4.7	-8.5 ⁽¹⁹⁾	-6.2	24.8	-	-1709.0	-27.7	-2.5	-1.9	-	-4.7E-03	1.3E-03	-	5.4E-04	2.6E-04 ⁽¹⁹⁾	-	-	-	1.4E-03	0.1	-0.3	-	-0.5	-	-	0.76	1.83E-03	0.72 ± 0.03		
F	40.8 ⁽¹⁹⁾	-0.1	-	-	4.7	-	-	-	-0.5	-233.3	-	-	-2.4	-2.2	-	-5.0E-04 ⁽¹⁹⁾	1.1E-04 ⁽¹⁹⁾	9.9E-04	5.4E-04	-	-	2.6E-03	-	-	-2.6E-02	-	-	-	-	8.1	0.83	1.41E-01	0.66 ± 0.04		
I	-235.0 ⁽¹⁹⁾	-0.1 ⁽¹⁹⁾	-	60.9	-33.0	-	-7.0	7.7	36.3	-	-	-	-2466.0	-55.7	-1.2	-0.8	-2.9E-04 ⁽¹⁹⁾	-	-	-	-	1.3E-03 ⁽¹⁹⁾	-	-	-	-0.1	0.2	-8.1E-03	0.2	-	-	0.63	2.02E-01	0.98 ± 0.02	
J	-762.0	-	16.2	-	12.2	2.2 ⁽¹⁹⁾	-	3.8	0.5	-	-	17.7	-1.2	-0.9	-	-1.3E-03	-5.1E-04	5.9E-04 ⁽¹⁹⁾	4.0E-04 ⁽¹⁹⁾	1.4E-03	-	-0.1	-2.0E-03	-	-0.2	-	-	-	-	-	0.2	0.78	3.19E-01	0.80 ± 0.02	

(1)Finca. (2)Intercepto. (3)Precipitación. (4)Temperatura mínima. (5)Temperatura media. (6)Temperatura máxima. (7)Humedad relativa mínima. (8)Humedad relativa promedia. (9)Humedad relativa máxima. (10)Brillo solar acumulado. (11)Brillo solar mínimo. (12)Brillo solar promedio. (13)Brillo solar máximo. (14)ENSO, condición niño. (15)ENSO, condición normal. (16)Coeficiente de determinación ajustado. (17)Test Shapiro-Wilk. (18)Error Cuadrado Medio de predicción. (19)Variable no significativa en el modelo, valor $p \geq 0.05$.

4. Modelo espacial para la Sigatoka negra a través de la variable biológica hoja más joven manchada en banano en la región de Urabá

Resumen

Mycosphaerella fijiensis M. Morelet, es uno de los agentes causales del “complejo Sigatoka”, el cual, es la enfermedad más destructiva en los cultivos de banano y plátano. En el presente trabajo, se modeló espacialmente mediante técnicas geoestadísticas, la hoja más joven manchada - HMJM, como variable biológica indicadora del estado de severidad de la enfermedad en la plantación, con el objetivo de determinar su estructura y categoría de dependencia espacial. La HMJM, se evaluó en las semanas 43 y 45 a 47 de 2005, sobre 71 plantas de banano cv. Gran Enano con emisión reciente de su inflorescencia, ubicadas en las intersecciones de una malla irregular, con una distancia mínima entre pares de plantas de 21 m y una distancia máxima de 1077 m, en una finca bananera, situada en el municipio de Carepa (Antioquia), zona de vida bosque húmedo tropical (bh-T). La variable, presentó un comportamiento anisotrópico para las semanas 45, 46 y 47; éste, se describió a partir de un modelo gaussiano en cada una de las semanas, con un rango de dependencia espacial decreciente de 673,25, 345,53 y 296,36 m, respectivamente, el cual diverge de los modelos reportados en otras investigaciones, en patosistemas similares. Los modelos que se ajustaron para las semanas 45 y 47, evidenciaron fuerte dependencia espacial; el modelo de la semana 46, moderada dependencia espacial, y; el modelo de la semana 43, nula dependencia espacial.

Palabras clave: *Pseudocercospora fijiensis*, *Musa* sp., kriging, Matérn.

4.1 Introducción

Chellemi *et al* (1988) afirman que la caracterización de la posición espacial de los miembros de una población de organismos como: patógenos de plantas y plantas enfermas, pueden facilitar la determinación de variables como la relación entre la densidad de inóculo y la incidencia de la enfermedad, parámetros óptimos de muestreo y, la influencia de factores culturales, biológicos y ambientales en la dinámica de poblaciones; establecer mapas de la distribución y expansión espacial de cualquier enfermedad y su intensidad sobre el área de estudio (Moreira *et al*, 2010; Ramírez *et al*, 2011; Sánchez-Pale *et al*, 2011). Para tal fin, se usan aproximaciones de la geoestadística, a través de las cuales, es posible cuantificar el comportamiento espacial de variables no fácilmente perceptibles en múltiples direcciones del espacio (patrón espacial) a distintas escalas seleccionadas (Gallardo, 2006; Ramírez *et al*, 2011; Sanchez-Pale *et al*, 2011). Araújo *et al* (2012) aseveran, además, que la geoestadística, es una herramienta importante en el análisis de datos espaciales y en la generación de información y conocimiento que puede ser empleado en la agricultura de precisión; con la cual, según Zucoloto *et al* (2009), Ramírez *et al* (2011) y Sánchez-Pale *et al* (2011) sería posible obtener ahorros económicos y ambientales al poder dirigir las diversas alternativas de control hacia las zonas específicas de infestación.

Ramírez *et al* (2011) y Sánchez-Pale *et al* (2011) en 20 localidades de 19 municipios del Estado de México (México) durante el 2006 y, 30 localidades de 27 municipios del mismo Estado durante el 2008, respectivamente, para el patosistema *Sporisorium reilianum* (Kühn) Langdon y Fullerton – *Zea mays* L., encontraron un comportamiento espacial agregado de la enfermedad con alta dependencia espacial; el cual describieron, durante el 2006, en 16 localidades, mediante modelos esféricos con un rango que osciló entre 143.24 y 1461.50 m; en dos localidades, por medio de modelos exponenciales con rangos de 613.85 y 1671.30 m, y; en dos localidades, a través de modelos gaussianos con rangos de 237.54 y 567.70 m y, durante el 2008, en 21 localidades, mediante modelos esféricos con un rango que osciló entre 157.29 y 1730.80 m; en cinco localidades, por medio de modelos exponenciales con un rango que osciló entre 644.74 y 1083.09 m, y; en dos localidades, a través de modelos gaussianos con rangos de 2035.44 y 2230.19 m. Moreira *et al* (2010) ajustaron modelos gaussianos al patosistema *Candidatus Liberibacter* spp. –

Citrus sinensis (L.) Osbeck, los cuales presentaron alta dependencia espacial con rangos que oscilaron entre 300 y 560 m, en evaluaciones realizadas entre marzo de 2005 y julio de 2007 en el Estado de São Paulo (Brasil). Zucoloto *et al* (2009) asignaron un modelo exponencial al patosistema *Fusarium oxysporum* Schlecht f. sp. *cubense* – plátano cv. Prata-anã (*Musa* sp. AAB, subgrupo Prata), el cual evidenció alta dependencia espacial y un rango de 10 m, en una investigación desarrollada en el Estado de Espírito Santo (Brasil). No obstante, Almedia *et al* (2011) no hallaron dependencia espacial para el patosistema *Phytophthora nicotianae* Breda de Haan – *Allium cepa* L., en un estudio adelantado entre los meses de diciembre de 2005 y mayo de 2006 en el Estado de São Paulo.

Éstas metodologías, no han sido exploradas en detalle para el patosistema Sigatoka – *Musa* sp., salvo los trabajos adelantados en Brasil por Rocha *et al* (2010), Uchôa *et al* (2011), y Freitas (2013), en variedades comerciales de plátano y banano en ese país. En Colombia, éstas interacciones, no han sido analizadas mediante aproximaciones de la geoestadística en sus zonas productoras, por lo que, el objetivo con esta investigación, fue el de desarrollar, validar e implementar un modelo espacial para el patosistema Sigatoka negra (SN) – *Musa* sp. AAA cv Gran Enano a través de la variable biológica hoja más joven manchada en banano en la región de Urabá mediante métodos estadísticos, para determinar la estructura y categoría de dependencia espacial de la variable estudiada, en un área históricamente conocida por su alta incidencia de la enfermedad.

Publicaciones presentadas de este capítulo: Gómez-Correa, J.C., Torres-Aponte, W.S., Cayón-Salinas, D.G., Hoyos-Carvajal, L.M. & Castañeda-Sánchez, D.A. (2017). Modelación espacial de la Sigatoka negra (*Mycosphaerella fijiensis* M. Morelet) en banano cv. Gran Enano. Revista Ceres, Viçosa, 64(1), 047-054. doi: 10.1590/0034-737X201764010007

4.2 Materiales y metodología

4.2.1 Toma de datos

- Localización

La investigación, se llevó a cabo en las semanas 43 y 45 a 47 de 2005, en la finca bananera Punto Fijo, ubicada en el Municipio de Carepa (Antioquia), región de Urabá (Colombia), a 7°47'N, 76°41'W y 16 m de altitud.

- Malla de muestreo

Se georreferenciaron 51 puntos en una cuadrícula con celdas de 100 x 100 m, con un GPS marca Trimble® GeoXMTM, bajo el sistema de proyección UTM WGS1984 18 N, en los que se identificó por intersección, una planta de banano cv. Gran Enano (*Musa* sp. AAA, subgrupo Cavendish) que había emitido recientemente su inflorescencia y, dentro de la misma, se anidó una cuadrícula con celdas de 50 x 50 m, en la que se ubicaron espacialmente 20 puntos y georreferenció una planta de banano Cavendish cv. Gran Enano por sitio, con las mismas características; para finalmente obtener, una malla irregular compuesta por 71 plantas, con una distancia mínima entre pares de plantas de 21 m y una distancia máxima de 1077 m (Figura 4-1).

- Variable biológica

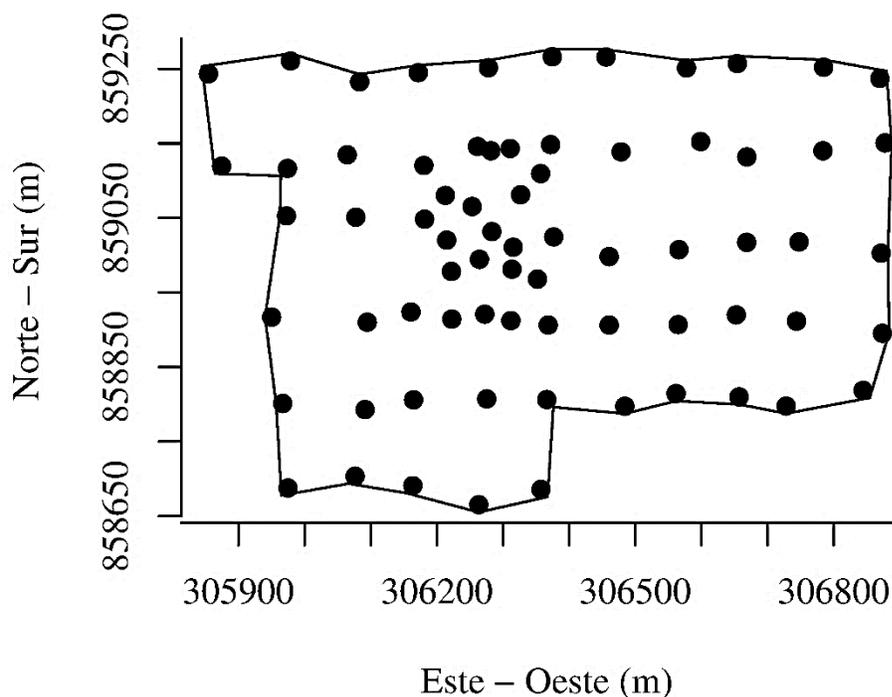
En cada una de las plantas, se registraron semanalmente datos de la hoja más joven manchada (HMJM) (Torres *et al*, 2006); como, la posición de la hoja más joven con síntomas finales de la enfermedad; estado cinco y seis, según los estados de evolución de la enfermedad descritos por Fouré y Ganry (2008).

4.2.2 Análisis estadístico

En el análisis estadístico, se usó como variable respuesta la HMJM y como covariables las coordenadas. Se realizó una comparación múltiple de las medias de las sumas de los rangos mediante el test de Kruskal-Wallis, por medio de la función `kruskal` del paquete `agricolae` (Mendiburu, 2016), puesto que los residuales del modelo: HMJM ~ SEMANA, no se ajustaron a una distribución normal, al ser evaluados mediante el test de normalidad de

Shapiro-Wilk (valor $p < 0.01$) y, las varianzas resultaron homocedásticas (valor $p > 0.01$), al ser calculadas con la prueba robusta tipo Brown-Forsythe Levene modificada, función `levene.test`, del paquete `lawstat` (Gastwirth *et al*, 2013). Para los análisis geoestadísticos, se verificó el supuesto de normalidad, mediante el coeficiente de asimetría Skewness según el rango establecido por Kerry y Oliver (2007).

Figura 4-1: Malla de muestreo.



Los procedimientos geoestadísticos, en toda el área muestreada ($n = 71$), se efectuaron con la evaluación del comportamiento espacial de la HMJM, en función de los ejes coordenados como estrategia de extracción de tendencia. Para estos análisis, se utilizó el paquete `geoR` (Ribeiro y Diggle, 2016). La dependencia espacial de la HMJM, se valoró en los semivariogramas empíricos: omnidireccional y en los ángulos de 0° , 45° , 90° y 135° , con el fin de elegir aquel en el que se evidenciara mayor rango o alcance (a) (distancia máxima a la que existe correlación entre parejas de puntos), mayor meseta ($C + C_0$) (semivarianza total) y menor efecto pepita (C_0) (semivarianza atribuida al error de medición y a la variabilidad presentada a una escala menor que la de muestreo). Se determinó la

existencia de dependencia espacial, con una confianza del 95%, cuando los primeros puntos de los semivariogramas seleccionados, cortaron la banda envolvente inferior, generada por medio de la función `variog.mc.env`. Posteriormente, se ajustaron tres modelos teóricos a cada uno de los semivariogramas empíricos, todos pertenecientes a la familia Matérn, por medio de la función `variogfit`, mediante la variación del parámetro de suavización Kappa, al cual se le asignaron valores de 0.5, 1.5 y 2.5; según Diggle y Ribeiro (2007) un modelo exponencial cuando Kappa = 0.5 y, un modelo gaussiano cuando Kappa tiende a infinito.

De cada uno de los modelos teóricos ajustados, se extrajo el valor de la meseta y del rango y, al evaluar la proporción del efecto pepita (C_0) respecto a la meseta ($C_0 + C$), se asignó una categoría de dependencia espacial según Cambardella *et al* (1994) (ver Ecuación (4.1)), quienes califican la variable como: fuertemente dependiente, cuando el porcentaje de dependencia espacial fue inferior al 25%; medianamente dependiente, cuando se encontró entre el 25 y el 75% y; débilmente dependiente, cuando superó el 75%. Se fijó un modelo “Efecto pepita puro”, en los casos que no se detectó dependencia espacial y, finalmente, se generaron mapas predictivos para la variable, a partir del modelo teórico que arrojó el menor valor de mínimos cuadrados ponderados (MCP), para cada uno de los casos en los que se identificó dependencia espacial mediante un kriging ordinario, por medio de las funciones `krige.control` y `krige.conv`. Según Moreira *et al* (2010) lo que permite ver el comportamiento de la variable objeto de estudio a través de mapas de isolíneas. Todos los procedimientos anteriores, desarrollados en el software R (R Core Team, 2016).

$$\text{Dependencia espacial} = \frac{C_0}{C_0 + C} 100 \quad (4.1)$$

4.3 Resultados y discusión

La posición de la HMJM, varió entre la hoja seis y la hoja 11 y, se observaron, las hojas más jóvenes manchadas, en las semanas 43 y 47 (Tabla 4-1). A partir de la comparación múltiple de las medias de las sumas de los rangos mediante el test de Kruskal-Wallis, se encontró que la semana 47, se diferenció significativamente (valor $p < 0.05$) de las semanas 43 y 46, mas no de la semana 45, las semanas 43, 45 y 46 no difirieron entre sí.

En términos generales, la población de plantas evaluadas presentó, para las semanas 43 y 47, plantas con la HMJM entre las hojas seis y 10, mientras que, para las demás semanas, entre las hojas siete y 11, lo que indica que, para el período trabajado, la enfermedad, exhibió un comportamiento relativamente estable.

Tabla 4-1: Estadísticos resumen del comportamiento de la Sigatoka negra, evaluada a través de la hoja más joven manchada durante cuatro semanas, año 2005.

Estadísticos de la HMJM	Semana			
	43	45	46	47
Mínimo	6.00	7.00	7.00	6.00
Mediana	8.00	8.00	8.00	8.00
Media	8.11	8.07	8.25	7.77
Máximo	10.00	11.00	11.00	10.00
Skewness	-0.10	0.64	0.31	0.42
Desviación estándar	0.89	0.92	1.01	0.81
Coefficiente de variación (%)	10.94	11.34	12.24	10.47
R ² , tendencia lineal	0.05	0.21	0.04	0.04
R ² , tendencia cuadrática	0.09	0.23	0.07	0.09

A partir del análisis de tendencia espacial, para la HMJM, en función de los ejes coordenados, se deduce que la enfermedad presentó un comportamiento estacionario, es decir, que el valor promedio de la HMJM, se puede considerar estadísticamente similar en cualquier sector del campo de estudio, esto evidenciado, en la no relación de esta variable con los ejes coordenados, tanto a través de una superficie lineal como cuadrática. En el caso lineal, se obtuvieron coeficientes de determinación (R²), que variaron entre 0.04 y 0.21 según la semana y, en el cuadrático, entre 0.07 y 0.23, siendo, además, modelos no significativos (valor p > 0.05), para las semanas 43, 46 y 47 (Tabla 4-1). En términos prácticos, estos resultados indican que, en el área trabajada, las características bióticas y abióticas que condicionan el desarrollo de la enfermedad, no presentan cambios significativamente contrastantes en función de los ejes coordenados como para que el valor promedio de la HMJM, presentara un comportamiento diferencial en ciertos sectores del cultivo.

La semivarianza de la HMJM, tuvo un comportamiento anisotrópico para las semanas 45, 46 y 47 (Tabla 4-2); el mayor rango, meseta y categoría de dependencia espacial, se

presentó para una dirección de 90° en las semanas 45 y 46 y, para una dirección de 0° en la semana 47; lo que significa, que la relación de la enfermedad, entre pares de puntos separados a diferentes distancias, depende de la dirección; en otras palabras, se detectó un mayor grado de similitud (autocorrelación o dependencia espacial) y a una mayor distancia, en el nivel de enfermedad presentado por las plantas, para ciertas direcciones respecto a otras. Lo anterior implica, que, para los diferentes ángulos de evaluación, la dependencia espacial varió, lo que permitió identificar ángulos en los que la autocorrelación de la HMJM alcanzaba mayores distancias, mayor rango de dependencia espacial; mientras que, para otras direcciones, la autocorrelación se perdía a una menor distancia entre pares de puntos, menor rango de dependencia espacial. En la práctica, esta variación en la dependencia espacial, probablemente, pueda deberse a cambios de dirección de los patrones de las corrientes de aire en la región de estudio; los vientos en Urabá exhiben un fuerte ciclo anual, además, de importantes variaciones del ciclo diurno de la velocidad del mismo a través del año, especialmente en los trimestres diciembre – febrero y marzo – mayo, durante los cuales, el inóculo es transportado del norte al sur de la región de Urabá (Ochoa *et al*, 2012). Estos, pueden incidir en una dispersión diferencial de los propágulos del agente causal de la enfermedad, al ser dependientes de la dirección de las corrientes de aire dentro la de plantación.

Según Mourichon y Zapater (1990) las ascosporas liberadas quedan a merced de las corrientes de aire laterales, que las transportan a grandes distancias y corrientes ascendentes que las transportan a las hojas superiores más jóvenes. No obstante, Burt (2002) encontró mayor número de conidias que ascosporas en trampeos realizados por debajo, entre y sobre el dosel de la plantación, entre diciembre de 1993 y febrero de 1994, en tierras altas, mientras que Gauhl (1994), encontró más ascosporas que conidias en tierras bajas, lo que genera confusión al discutir el posible inóculo responsable de los patrones dinámicos de la enfermedad en la plantación, ya que éste pareciera depender de las condiciones ambientales moduladas por la topografía donde se encuentra ubicada la plantación.

Tabla 4-2: Parámetros de los modelos teóricos ajustados al comportamiento espacial de la Sigatoka negra, evaluada a través de la hoja más joven manchada durante cuatro semanas, año 2005.

Semana	Semi-Variograma	Modelo	Kappa ⁽¹⁾	C ₀ ⁽²⁾	(C ₀ + C) ⁽³⁾	a ⁽⁴⁾ (m)	(C ₀ / (C ₀ + C)) ⁽⁵⁾	MCP ⁽⁶⁾
43	Omni-direccional	Efecto pepita puro		0.42	0.42	0.00	1.00	0.10
45	90°	Matérn	0.50	0.00	0.64	1665.58	0.00	10.13
			1.50	0.00	0.47	771.26	0.00	6.67
			2.50	0.00	0.45	673.25	0.00	5.70
46	90°	Matérn	0.50	0.00	0.69	314.11	0.00	1.45
			1.50	0.26	0.69	356.02	0.38	1.33
			2.50	0.29	0.68	345.53	0.43	1.27
47	0°	Matérn	0.50	0.00	0.73	806.70	0.00	4.16
			1.50	0.00	0.52	344.08	0.00	1.93
			2.50	0.00	0.49	296.36	0.00	1.39

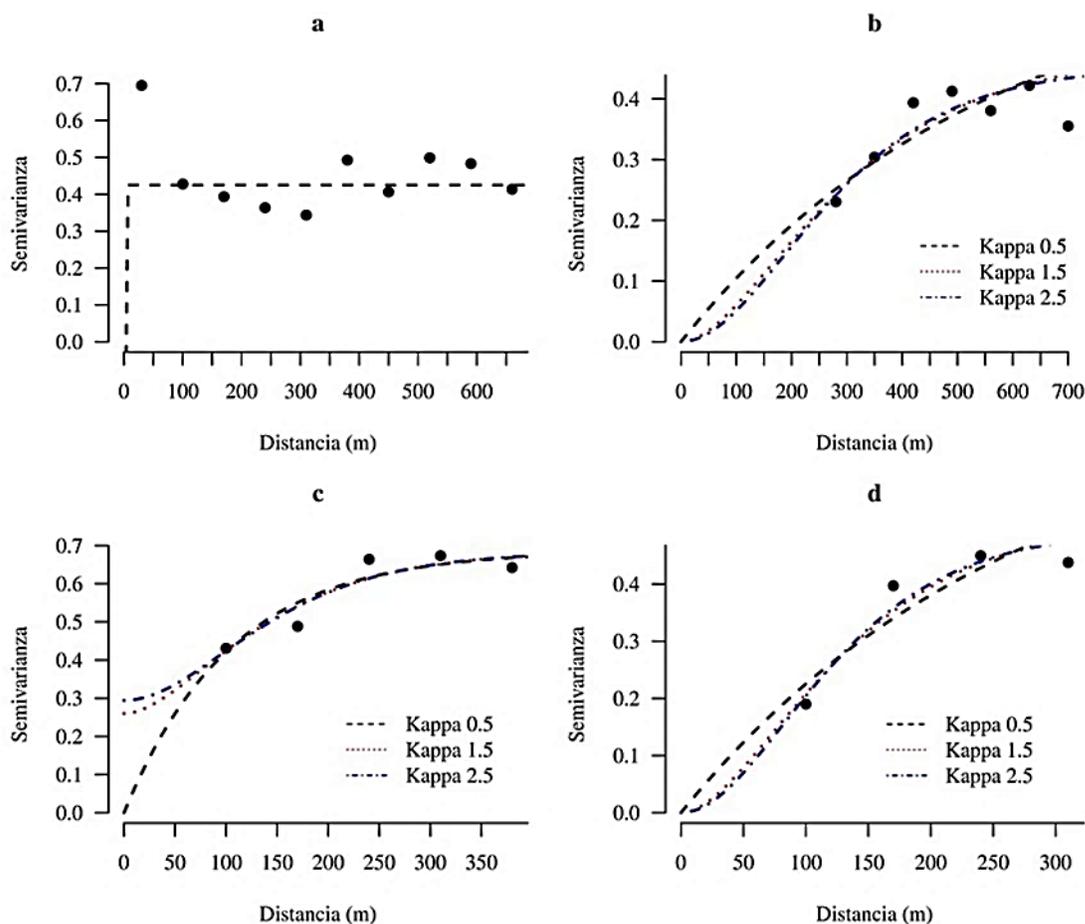
⁽¹⁾Modelo exponencial cuando Kappa = 0.5 y un modelo gaussiano cuando Kappa tiende a infinito (Diggle y Ribeiro, 2007). ⁽²⁾Efecto pepita. ⁽³⁾Meseta. ⁽⁴⁾Rango. ⁽⁵⁾Dependencia espacial. ⁽⁶⁾Mínimos Cuadrados Ponderados.

Para el caso de estudio, en la semana 43, no se halló dependencia espacial, por lo que se asignó un modelo “Efecto pepita puro”, a partir del cual se concluyó, que, durante esta semana de evaluación, la posición de la HMJM, exhibió un comportamiento aleatorio en el área de estudio. Almeida *et al* (2011) quienes ajustaron éste mismo modelo a la distribución espacial de *Phytophthora nicotianae* en un cultivo de cebolla, concluyeron, que se debe al alto índice de infestación del hongo en toda el área evaluada. Para las demás semanas, si se detectó estructuración espacial para la SN. Los modelos Matérn, que menor suma de MCP presentaron, fue cuando se usó un valor de Kappa de 2.5, lo que se aproxima, a un modelo gaussiano según Diggle y Ribeiro (2007) (Figura 4-2).

Estos resultados, contrastan con los encontrados por Freitas (2013) quien ajustó dos modelos exponenciales para la SA, en una plantación de plátano cv. Prata-anã, localizada en Lavras, Estado Minas Gerais (Brasil), los cuales exhibieron una moderada dependencia espacial (60.32%) y un rango de 193.71 m para la malla principal y, una fuerte dependencia espacial (0%) y un rango de 6.58 m para la malla secundaria. Los modelos hallados en el presente estudio, describen que el rango de la dependencia espacial de la enfermedad, disminuyó con el tiempo: 673.25, 345.53 y 296.36 m, semana 45, 46 y 47, respectivamente,

además, de una fuerte dependencia espacial (0%) para las semanas 45 y 47, mientras que para la semana 46, se obtuvo una moderada dependencia espacial (42.56%), según las categorías de dependencia espacial propuestas por Cambardella *et al* (1994).

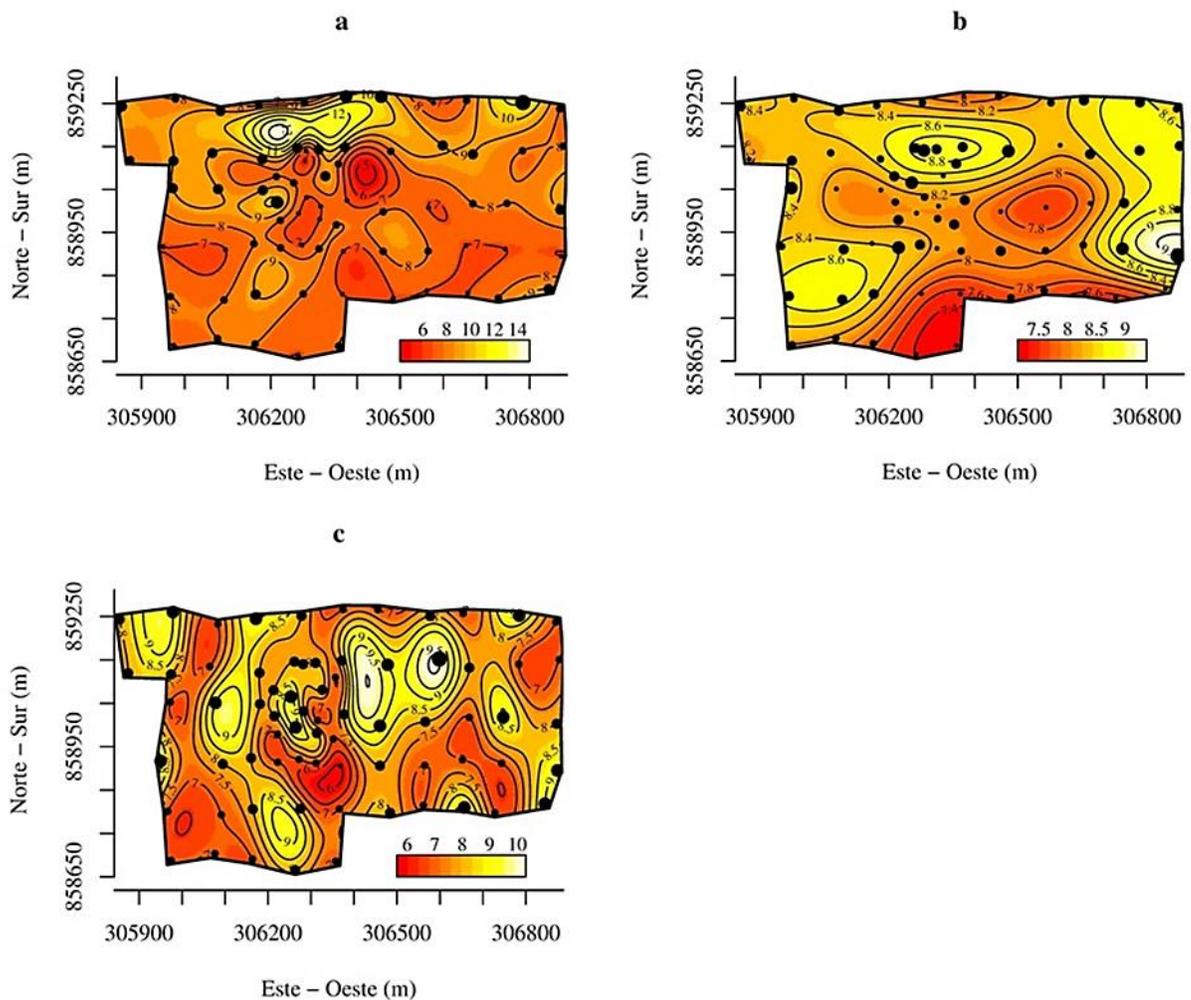
Figura 4-2: Modelos teóricos ajustados al comportamiento espacial de la Sigatoka negra, evaluada a través de la hoja más joven manchada durante cuatro semanas, año 2005. a. Semana 43: semivariograma omnidireccional, modelo: “Efecto pepita puro”; b. y c. Semana 45 y 46: modelo: Matérn, ángulo de anisotropía: 90°, relación de anisotropía: uno y 1.5, respectivamente; d. Semana 47: modelo: Matérn, ángulo de anisotropía: 0°, relación de anisotropía: dos.



Adicionalmente, los modelos gaussianos, se diferencian de los exponenciales, al representar espacialmente una variable homogénea como se evidencia en la Figura 4-3, donde para todas las semanas, el valor de la HMJM varía poco entre puntos separados a

grandes distancias, lo que coincide, con los resultados logrados por Ramírez *et al* (2011) y Sanchez-Pale *et al* (2011) quienes concluyeron, que para las localidades en las que se asignó un modelo exponencial, manifestaron una distribución de límites irregulares o aleatorios de *Sporisorium reilianum* dentro del área de estudio, mientras que, en las que se estableció un modelo gaussiano, se observó que la enfermedad se expresó en forma o expansión continua respecto de los puntos muestreados.

Figura 4-3: Mapas predictivos del comportamiento espacial de la Sigatoka negra, evaluada a través de la hoja más joven manchada durante cuatro semanas, año 2005. a. y b. Semana 45 y 46: modelo: Matérn, ángulo de anisotropía: 90°, relación de anisotropía: uno y 1.5, respectivamente, Kappa: 2.5 (modelo gaussiano); c. Semana 47: modelo: Matérn, ángulo de anisotropía: 0°, relación de anisotropía: dos, Kappa: 2.5 (modelo gaussiano).



Los mapas de predicción, presentados en la Figura 4-3, muestran que, en la mayor parte del área de estudio, el nivel de enfermedad según la HMJM, se situó entre las hojas siete a nueve (regiones naranjas a rojo), con unas pocas áreas relativamente más sanas, HMJM mayor a 11 (regiones amarillo a blanco). Para la semana 46, los niveles más altos de enfermedad, se localizaron hacia la parte sur y centro del lote, mientras que en la semana 47, se evidenció un comportamiento por focos o agregados, con áreas pequeñas de diferentes niveles de enfermedad distribuidos a través del campo, comportamiento que evidencia el menor alcance en la relación entre muestras a medida que se incrementó la distancia, semejante a lo encontrado por Rocha *et al* (2010), quienes al realizar la caracterización espacial de la SA en tres plantaciones de plátano cv. Pacovan (*Musa* sp. AAB, subgrupo Prata), ubicadas en el Valle del Siriji, Estado de Pernambuco (Brasil), identificaron un patrón agregado de plantas enfermas, al observar, que la forma de los agregados fue alargada con dirección a los surcos, con una dependencia espacial continua hasta de 81 m, mientras que lateralmente fue de hasta 39 m.

Uchôa *et al* (2011) no encontraron dependencia espacial para la variable severidad, evaluada según la escala de Stover modificada por Gauhl (1994), en el patosistema SN – banano cv. Gran Enano, puesto que el valor del efecto pepita y la meseta, es el mismo; y, según las categorías de dependencia espacial propuestas por Cambardella *et al* (1994) indica una nula dependencia espacial, ya que la relación del efecto pepita respecto a la meseta es superior al 75% (ver Ecuación (4.1)). En la práctica y para las condiciones del área de estudio, los modelos, muestran un comportamiento dinámico de la enfermedad, cuyos cambios son detectables a rangos temporales muy cortos, una semana. En este caso, la enfermedad, pasó de una fase de comportamiento aleatorio o nula dependencia espacial en la semana 43, a una más fuerte relación espacial; fuerte y moderada dependencia espacial, semanas 45 y 46, respectivamente, en la dirección norte-sur (90°) del área de estudio; sin embargo, para la semana 47, además de haberse disminuido significativamente el alcance de la relación entre muestras, la dirección de ésta, cambió hacia la dirección este-oeste del área, no obstante, exhibió una fuerte dependencia espacial.

5. Integración e instrumentación de los modelos

5.1 Introducción

El objetivo del presente capítulo fue el de discutir la integración e instrumentación de los modelos propuestos, así como el de analizar la viabilidad e implementación de los mismos, acorde a la realidad actual de la región bananera de Urabá. Para esto, se procedió con un análisis descriptivo sobre la relevancia de los resultados encontrados con los modelos para las variables estado de evolución de la enfermedad (EE) y hoja más joven enferma (HMJE), como estrategias importantes para evaluar el comportamiento estacional y regional de la enfermedad. Posteriormente, se analizó la relevancia de los modelos espaciales como herramienta, para lograr una mejor definición del comportamiento de la enfermedad a escala de lote evaluada a través de la hoja más joven manchada (HMJM), con miras a definir un manejo más preciso de esta.

5.2 Modelos para el estado de evolución de la enfermedad y hoja más joven enferma

En términos generales, y, posterior al desarrollo y evaluación de un modelo genérico para la región (datos no mostrados), se evidenció a través del ajuste y precisión del mismo, que no es recomendable proponer un modelo para la región de Urabá, por el contrario, se sugiere, que para cada finca, se identifiquen los parámetros ambientales que mejor ajuste presenten acorde al desarrollo de la enfermedad, consecuencia no solo de la oferta ambiental, sino también del manejo agronómico, factores geomorfológicos y de suelos.

Los modelos de regresión lineal múltiple desarrollados para el EE y HMJE, según la frecuencia de las variables climáticas empleadas y se considere o no la interacción de

estas, presentaron coeficientes de determinación buenos (generalmente mayores para el EE que para la HMJE) para su implementación como herramientas de predicción de la severidad de la SN en una plantación.

Cuando se evaluó la evolución de la enfermedad a través del EE, se observó que esta variable fue muy buena indicadora para monitorear el comportamiento estacional de la enfermedad en función de la oferta ambiental, como lo demuestran el ajuste y la precisión de los modelos encontrados (Tabla 2-3 y Tabla 2-4), incluso, dado que las fincas presentan manejos agronómicos diferentes, refuerza la idea de modelos específicos, ya que se encontraron diferencias en los parámetros de los modelos. No obstante, la bondad del método, es una herramienta que requiere de un mayor conocimiento de la biología y sintomatología de la enfermedad en campo, aspectos no adquiridos por los inspectores de campo. El otro aspecto, se relaciona con la estimación, análisis e interpretación del EE, el cual es complejo, requiere de un mayor conocimiento de aspectos epidemiológicos y del ciclo de vida del agente causal de la enfermedad. Quizás sean estos aspectos los que hayan limitado el uso de este método en la región y solo se tiene conocimiento de uso en el Centro de Investigaciones del Banano (Cenibanano), pero no se conoce de su uso por los departamentos de Sanidad Vegetal, del sector en la región.

Caso contrario sucede con la HMJE, la cual es una variable de uso generalizado, capturada semanalmente por los inspectores de los departamentos de Sanidad Vegetal de las empresas de fumigación aérea. Aunque no con la misma precisión que el EE, presentó una buena asociación con las variables climáticas rezagadas o desfasadas (Tabla 3-1 y Tabla 3-2). Esto es, que es posible predecir el nivel futuro de la enfermedad conociendo el estado actual de algunas variables climáticas, requiriéndose en términos generales de un mayor número de variables y sobre todo de la evaluación de la interacción de las mismas, en comparación con el EE, que requiere de un menor número de variables.

En términos prácticos, se recomienda usar la variable HMJE, para evaluar el comportamiento estacional de la enfermedad a nivel de finca. Si bien los métodos de análisis pueden resultar complejos para los técnicos de la región, en una etapa posterior, se recomienda implementar a través de un algoritmo, todos los procedimientos de análisis requeridos para el modelamiento de la enfermedad, de tal manera que un técnico solo

tenga que ingresar los datos climáticos y los datos del monitoreo de la HMJE para hacer ajustes a los modelos y a través de una plataforma pronostique la evolución futura de la enfermedad en la finca. El EE, sería la variable a cuantificar, si el objetivo de la plantación adicionalmente al comercial fuese el de obtener información científica, puesto que además de las prácticas culturales y el control químico realizado, podría valorarse el efecto de prácticas en las que se empleen insumos biológicos u otros, como: promotores de crecimiento y de resistencia a la enfermedad o reguladores biológicos de las poblaciones del patógeno y, al adicionar esta información a la base de datos a partir de la cual se generaron los modelos, ajustar los mismos, incrementando su exactitud de predicción al disminuir el error cuadrado medio de predicción, lo que finalmente se traduciría en aplicaciones oportunas de fungicidas (protectantes) y no calendario como se hace y, la reducción en el número de ciclos de fungicidas sistémicos al utilizarse solo cuando haya un aumento del EE que lo justifique.

Los modelos así configurados, se convierten en una herramienta, de planificación del manejo de la enfermedad en cuanto a ciclos, rotación de productos, épocas a usar los diferentes tipos de productos. Por otro lado, en la medida en que más fincas vayan adoptando la metodología, probablemente las frecuencias de aspersion no sean las mismas para todas las fincas del bloque.

5.3 Modelos de variabilidad espacial

Los modelos de variabilidad espacial, permiten tanto predecir cómo explicar el comportamiento espacial del patrón de la enfermedad en una finca o región y probablemente permiten definir con mayor exactitud, áreas con igual intensidad de enfermedad y en consecuencia de aspersion.

Los modelos de variabilidad espacial, a diferencia de los modelos temporales, permiten tener una ventana de observación puntual en el tiempo, de la enfermedad, pero con información muy detallada del problema, en una región determinada. Entonces, si bien, los modelos espaciales no permiten explicar el comportamiento estacional de la enfermedad, estos, si dan cuenta, de otros factores que hacen que, en una finca, bajo la misma oferta ambiental haya sectores con mayor o menor disposición al desarrollo de la enfermedad,

como la direccionalidad de los vientos, el manejo agronómico, características geomorfológicas y de suelo, entre otros factores. En ese sentido los dos tipos de modelos implementados se consideran complementarios y deben ser considerados en un manejo adecuado e integral de la enfermedad.

Finalmente, si bien, ha resultado baja la adopción de metodologías más eficientes para determinar el momento ideal de aplicar un fungicida, como lo es la evaluación semanal del EE, que, según la uniformidad agroecológica de la plantación, resume en un indicador lo que está ocurriendo hasta en 200 hectáreas de plantación según lo afirman Fouré y Ganry (2008); la integración de la modelación espacial y temporal de cualquier variable biológica se dificulta aún más, ya que adicionalmente, a una mayor cantidad de plantas a evaluar, mínimamente 60, deben determinarse características físicas y químicas del suelo donde se encuentran establecidas cada una de las unidades experimentales evaluadas, que ayuden en la detección de zonas al interior de la plantación de menor o mayor severidad, con el propósito de tomar medidas correctivas que conlleven a homogenizar el desarrollo de la enfermedad en la plantación y así, aumentar la exactitud de la modelación temporal, lo que requiere mayores capacidades técnicas, económicas y de tiempo, que el agricultor generalmente no está dispuesto a asumir.

6. Conclusiones y recomendaciones

6.1 Conclusiones

El brillo solar mínimo fue la variable climática con mayor nivel de relación individual, respecto a la variable estado de evolución de la enfermedad; la precipitación, respecto a la hoja más joven enferma.

La temperatura media, humedad relativa mínima y promedia y, el brillo solar máximo, fueron consistentes en los modelos aditivos ajustados para el estado de evolución de la enfermedad en todas las fincas; la precipitación y el ENSO en su condición normal, para la hoja más joven enferma.

Las variables climáticas con mayor nivel de relación individual respecto a las variables biológicas, difieren, según estas evidencien directamente o indirectamente el estadio de desarrollo de la enfermedad, por ejemplo: al interferir en la aparición de síntomas apenas perceptibles al ojo (estadios uno y dos, escala de Fouré y Ganry (2008)), el brillo solar mínimo con el estado de evolución de la enfermedad; y, como factor determinante de la esporulación, liberación y germinación de las estructuras reproductivas, lo que se traduce en áreas necrosadas y síntomas de mayor facilidad de detección para el evaluador, la precipitación con la hoja más joven enferma.

Cuando se consideró, en los modelos, para el estado de evolución de la enfermedad, la interacción de las variables climáticas, el producto de la temperatura media con el brillo solar mínimo, fue consistente en los modelos ajustados para todas las fincas; la temperatura máxima individualmente, para la hoja más joven enferma.

Se encontraron modelos con mayor capacidad predictiva para la hoja más joven enferma, en cada una de las fincas, cuando estos consideraron la interacción de las variables climáticas, respecto a cuándo solo se tuvo en cuenta el efecto aditivo de estas.

Las diferencias, en la magnitud de las asociaciones, así como, en los tiempos de acumulación y de rezago, dependiente de si la resolución de estas es diaria o semanal, refuerzan la idea de desarrollar modelos predictivos para variables climáticas con resolución diaria.

La dirección de la relación presentada, positiva o negativa, por cada una de las variables climáticas, respecto a las variables biológicas, así como la configuración de variables e interacción entre estas en los modelos, particular a cada finca, refuerza la propuesta de elaborar modelos predictivos específicos para cada una de ellas, y no generales para la región o bloque de aplicación.

A partir de la captura del valor diario de las variables climáticas: precipitación (mm), temperatura (°C) máxima y mínima, brillo solar (horas) y humedad relativa (%) máxima y mínima y, la medición semanal del estado de evolución de la enfermedad o la hoja más joven enferma, es posible obtener modelos predictivos de las variables biológicas integrables a las estrategias de manejo y control de la enfermedad, como herramienta adicional para la toma de decisiones.

La HMJM es una variable que, para el caso estudiado en el cuarto capítulo, permitió describir el comportamiento espacial de la enfermedad en el área de estudio, describiendo los sitios de mayor y menor intensidad en el mismo, para diferentes periodos de evaluación.

Se detectó estructuración espacial para el patosistema Sigatoka negra - *Musa* sp. AAA, subgrupo Cavendish bajo las condiciones del bosque húmedo tropical (bh-T) y, se modeló esa estructuración, a través del modelo gaussiano de la familia Matérn, con el cual, se describió el comportamiento de la enfermedad en el campo de estudio, durante las semanas 45 a 47.

La enfermedad, presentó un comportamiento espacial dinámico a través del tiempo, evidenciado en el cambio de los patrones de estructuración, en cuanto al rango y dirección de la relación espacial.

Los modelos teóricos ajustados, presentaron mayores rangos de dependencia espacial a los obtenidos por otros autores en investigaciones similares en el patosistema Sigatoka amarilla – *Musa* sp. AAB, esto, debido quizás, al mayor potencial epidémico reportado para la Sigatoka negra y la menor susceptibilidad de los materiales AAB.

Los mapas de predicción, muestran un patrón más generalizado y estructurado para las semanas 45 y 46, mientras que, agregado o por focos para la semana 47.

6.2 Recomendaciones

Con el objetivo de obtener modelos con mayor capacidad de predicción, deben de realizarse nuevas investigaciones, en las que: se determine el número de plantas a evaluar a partir de la curva de errores estándar de la variable biológica, y; las variables climáticas sean medidas en cada una de las fincas.

Deben de realizarse nuevas investigaciones, en las que se identifiquen covariables determinantes de la dependencia espacial de la variable biológica estudiada y que a su vez lleven a entender el cambio del ángulo de anisotropía entre semanas.

Se recomienda para cada sector de intensidad, definirlo e identificarlo en campo, y evaluar otras características como, estado del sistema de drenajes, características del suelo relacionadas con la humedad del suelo, con el objeto de evaluar el aporte de estas variables en el favorecimiento del desarrollo de la enfermedad, con miras a plantear estrategias mucho más puntuales y precisas de manejo.

A.Anexo: Dinámica temporal de la hoja más joven enferma y de la precipitación

Figura 6-1: Dinámica temporal de la hoja más joven enferma y de la precipitación para la finca A, ubicada al sur de Carepa y norte de Chigorodó.

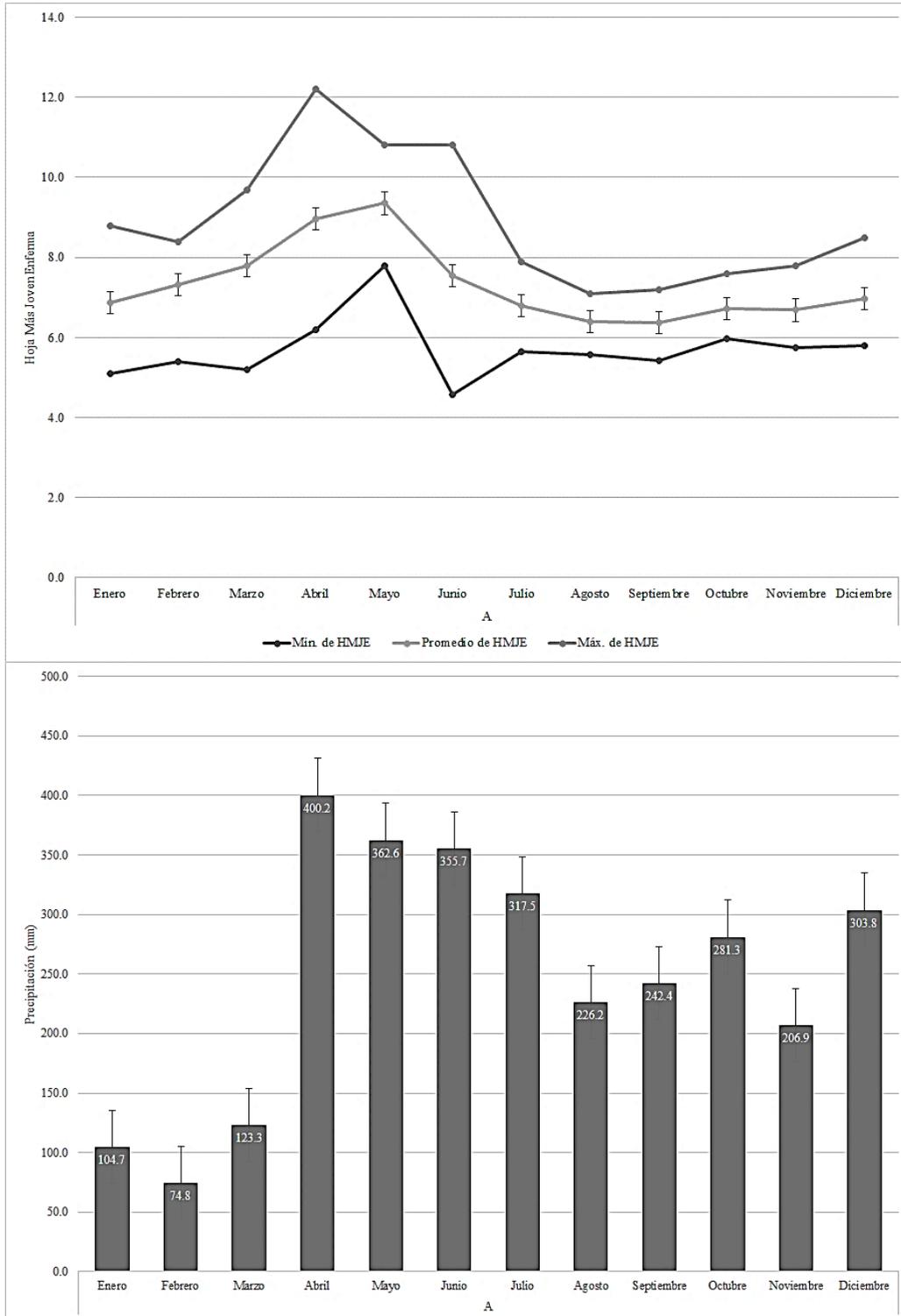


Figura 6-2: Dinámica temporal de la hoja más joven enferma y de la precipitación para la finca G, ubicada al sur de Carepa y norte de Chigorodó.

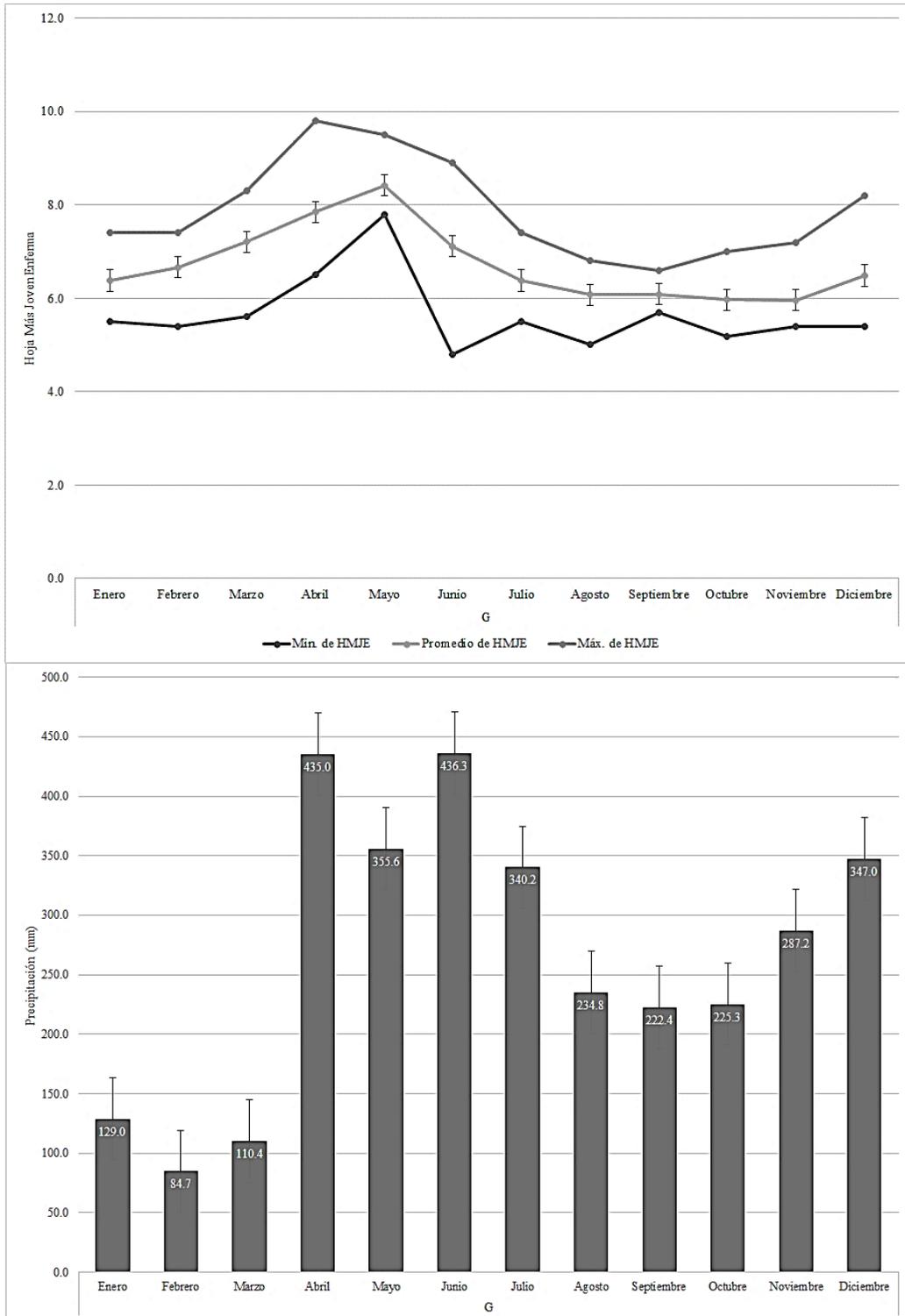


Figura 6-3: Dinámica temporal de la hoja más joven enferma y de la precipitación para la finca B, ubicada al sur de Apartadó y norte de Carepa.

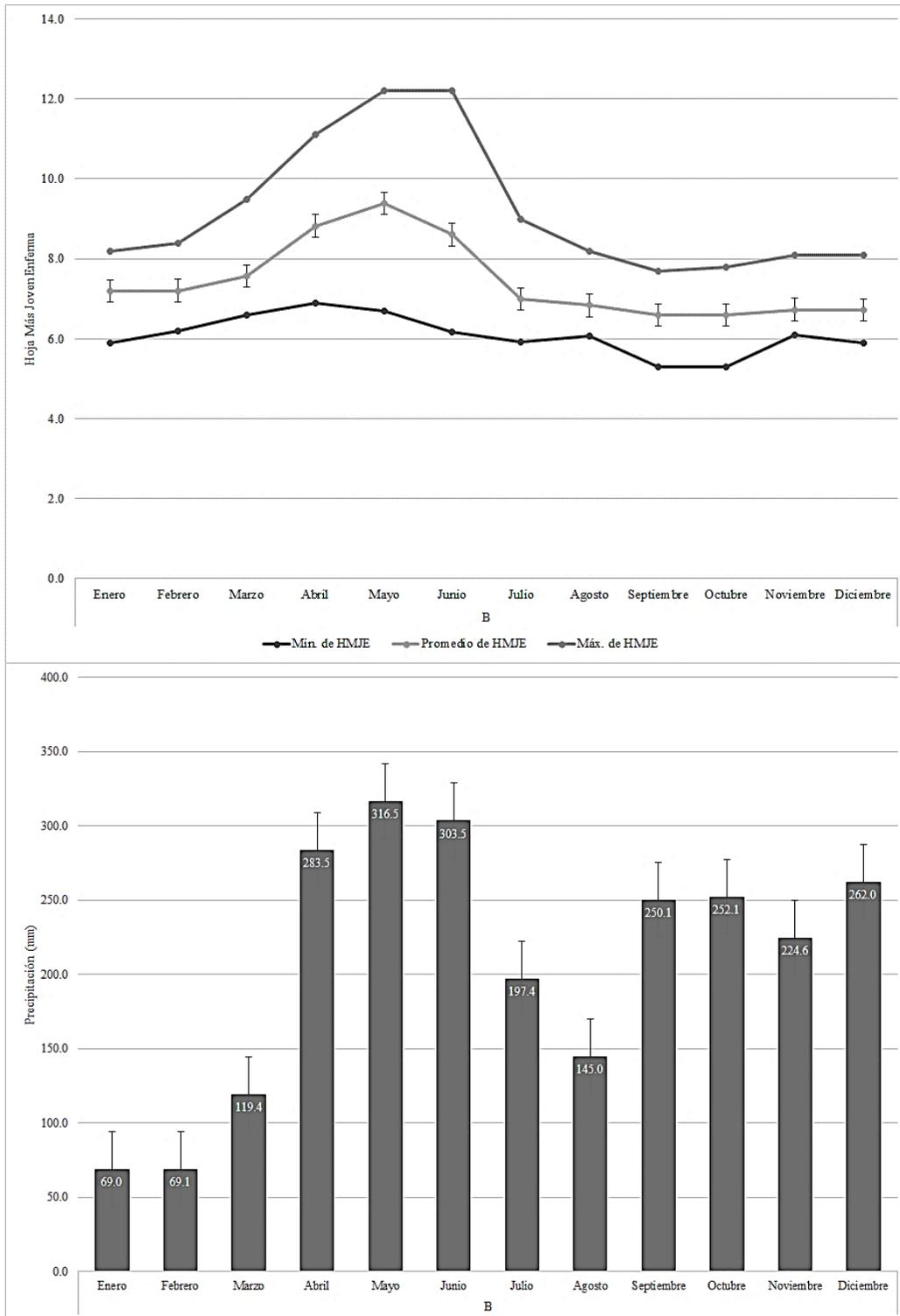


Figura 6-4: Dinámica temporal de la hoja más joven enferma y de la precipitación para la finca E, ubicada al sur de Apartadó y norte de Carepa.

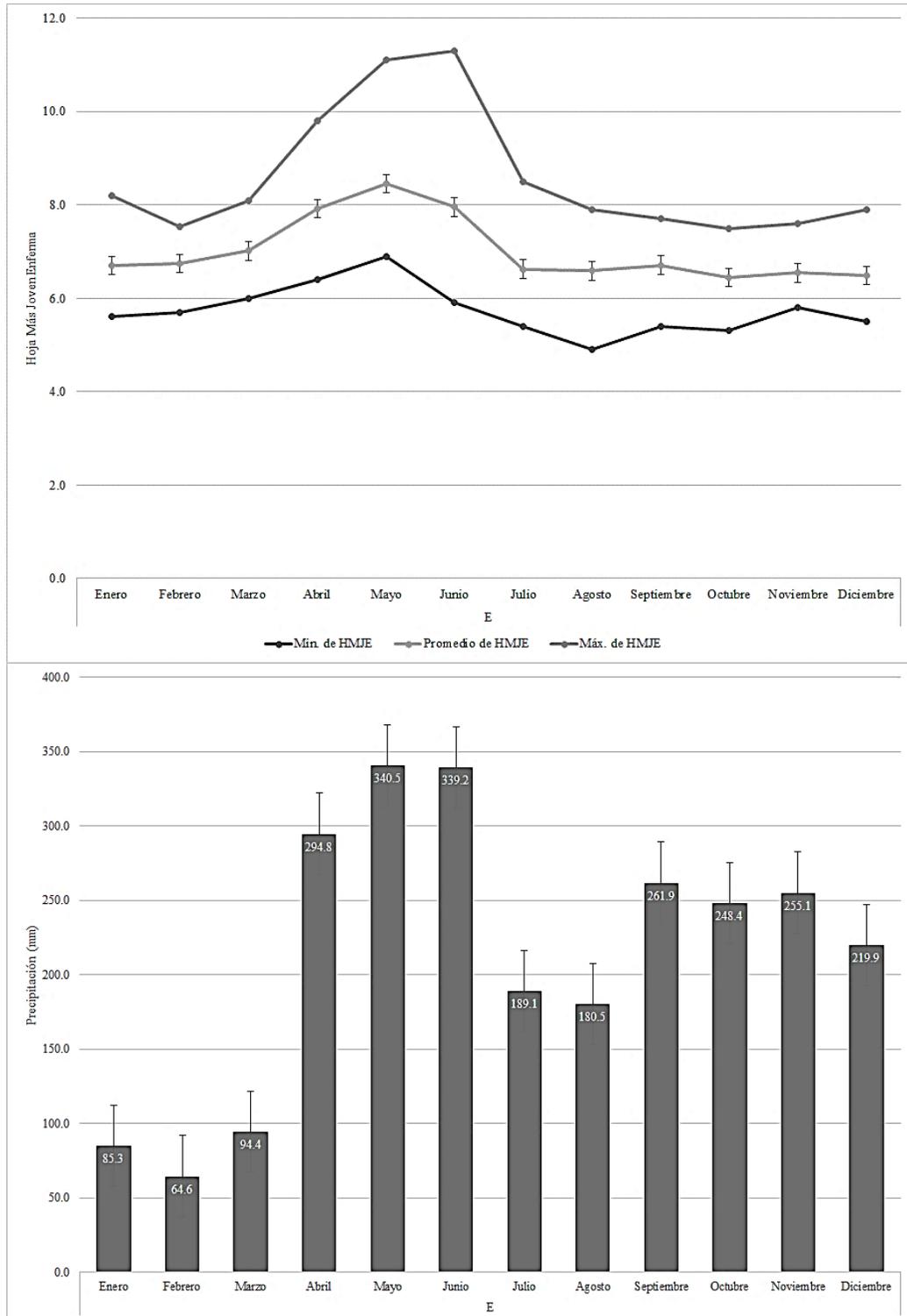


Figura 6-5: Dinámica temporal de la hoja más joven enferma y de la precipitación para la finca H, ubicada al sur de Apartadó y norte de Carepa.

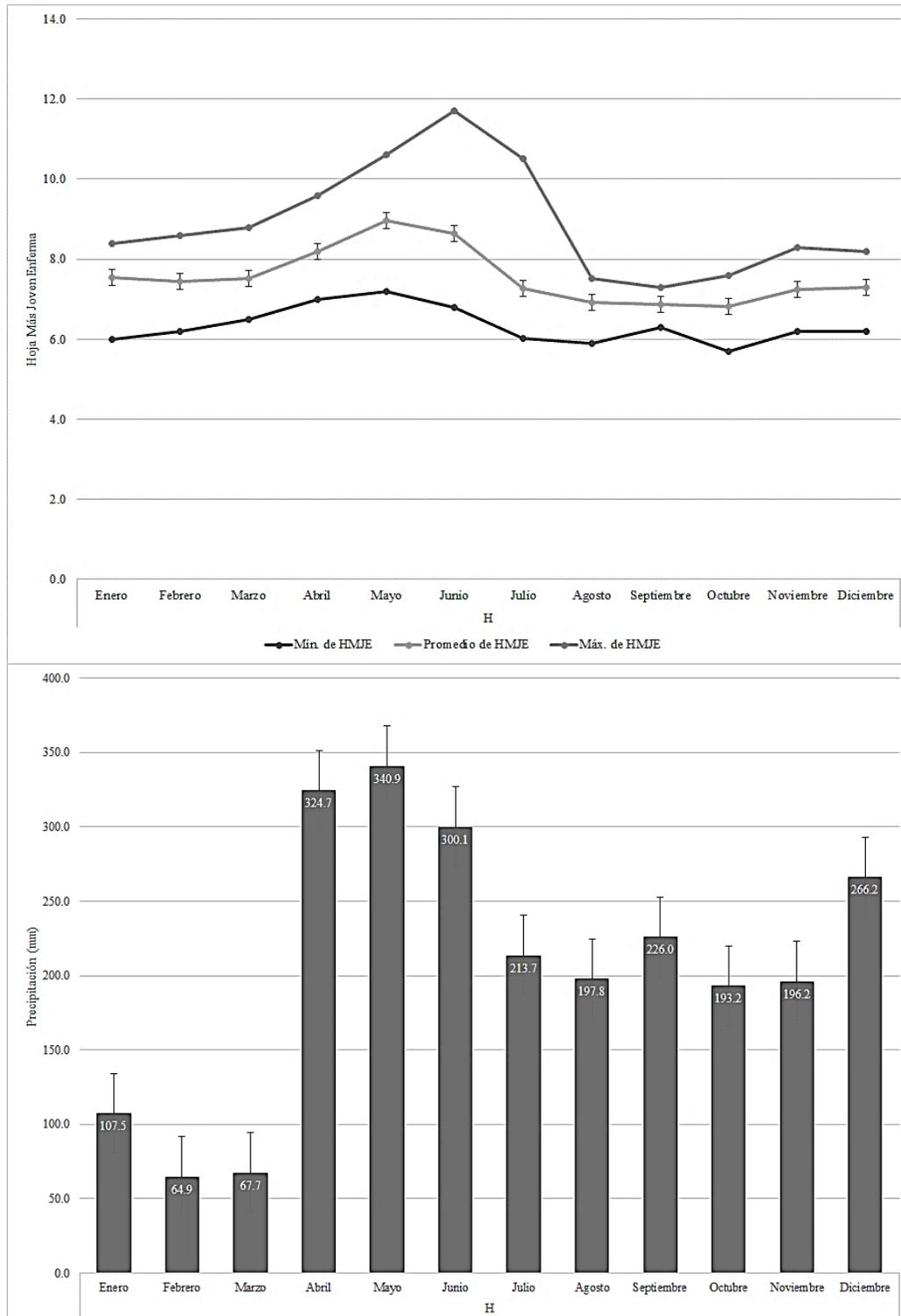


Figura 6-6: Dinámica temporal de la hoja más joven enferma y de la precipitación para la finca C, ubicada al sur de Turbo y norte de Apartadó.

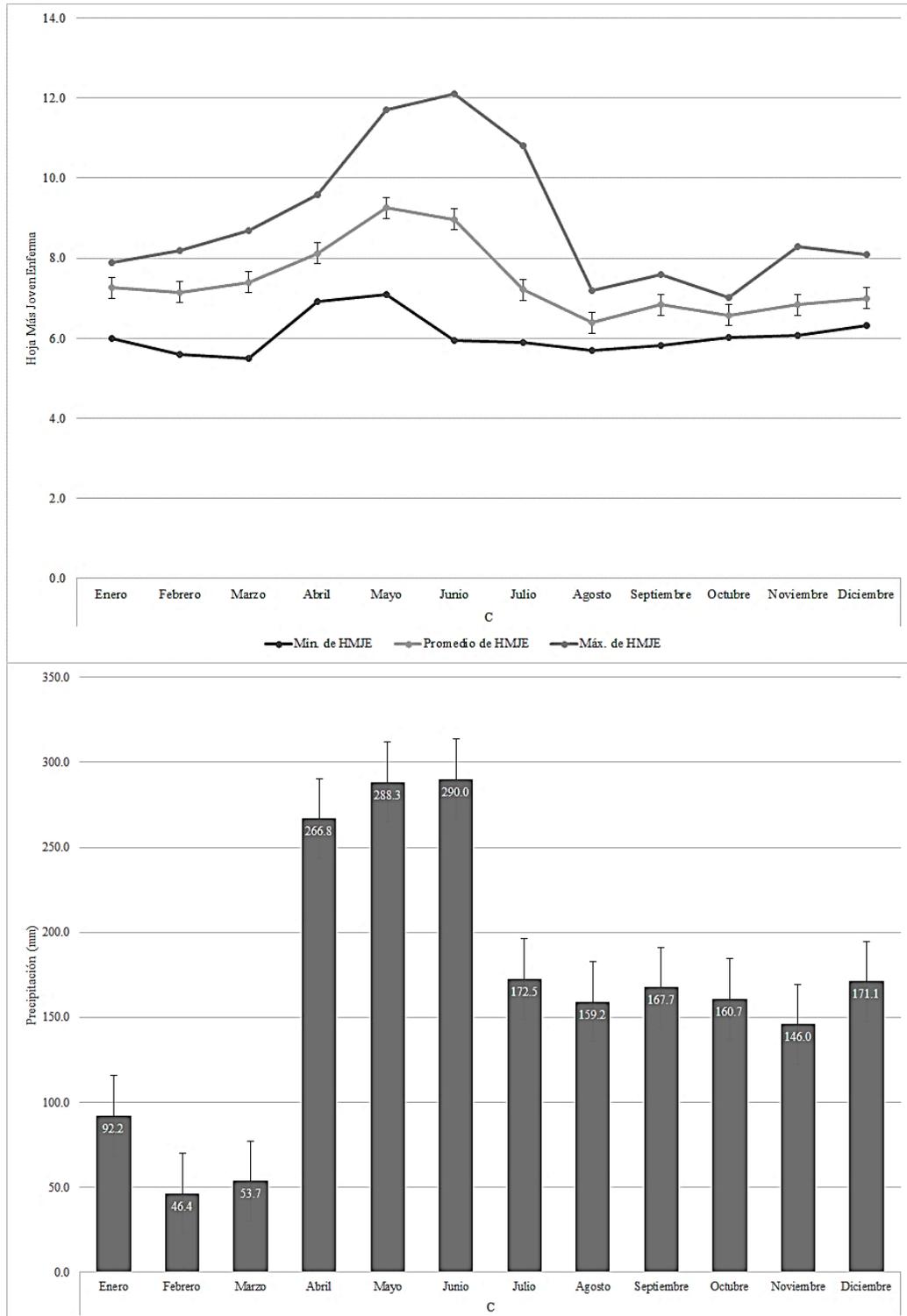


Figura 6-7: Dinámica temporal de la hoja más joven enferma y de la precipitación para la finca D, ubicada al sur de Turbo y norte de Apartadó.

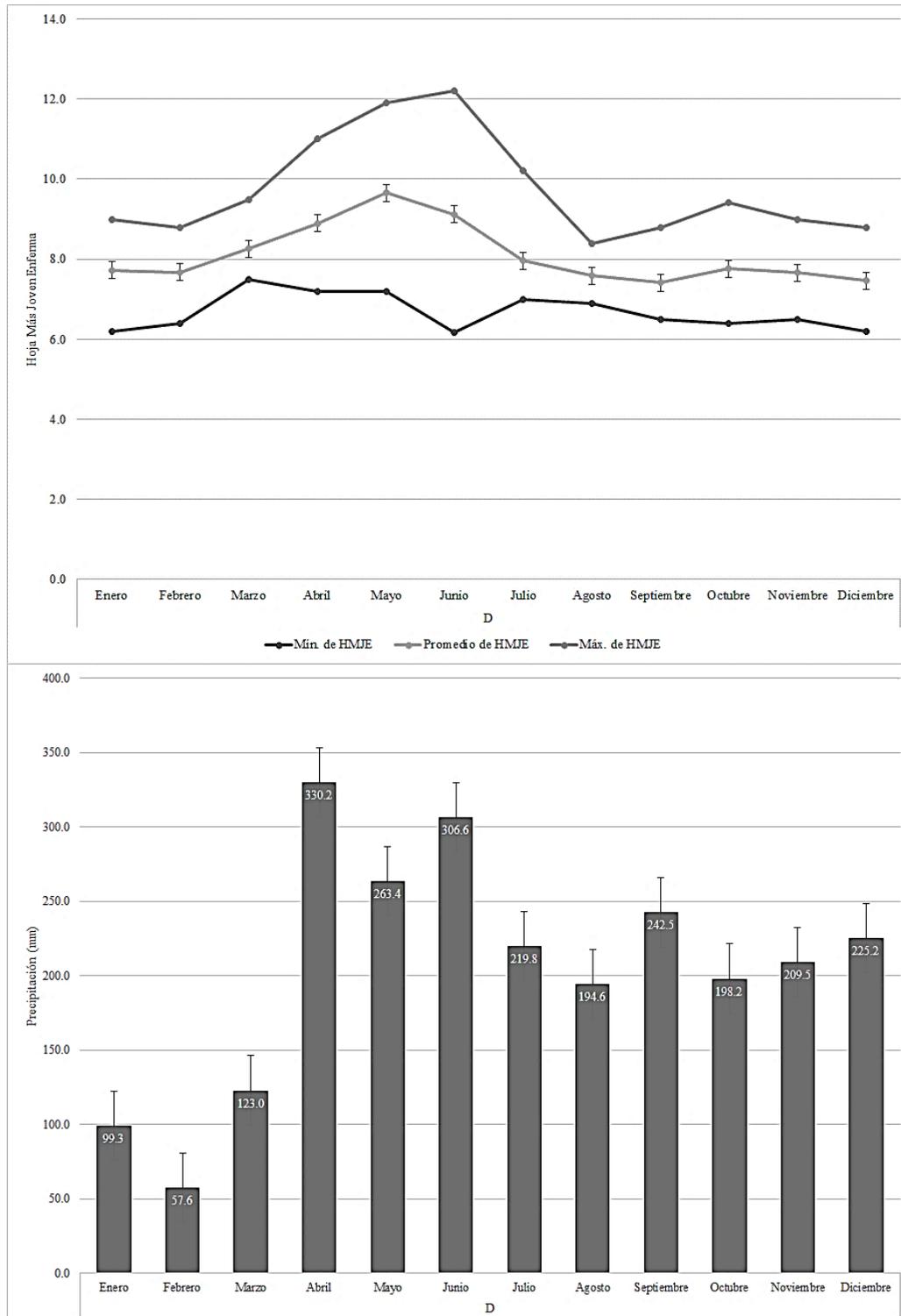


Figura 6-8: Dinámica temporal de la hoja más joven enferma y de la precipitación para la finca F, ubicada al sur de Turbo y norte de Apartadó.

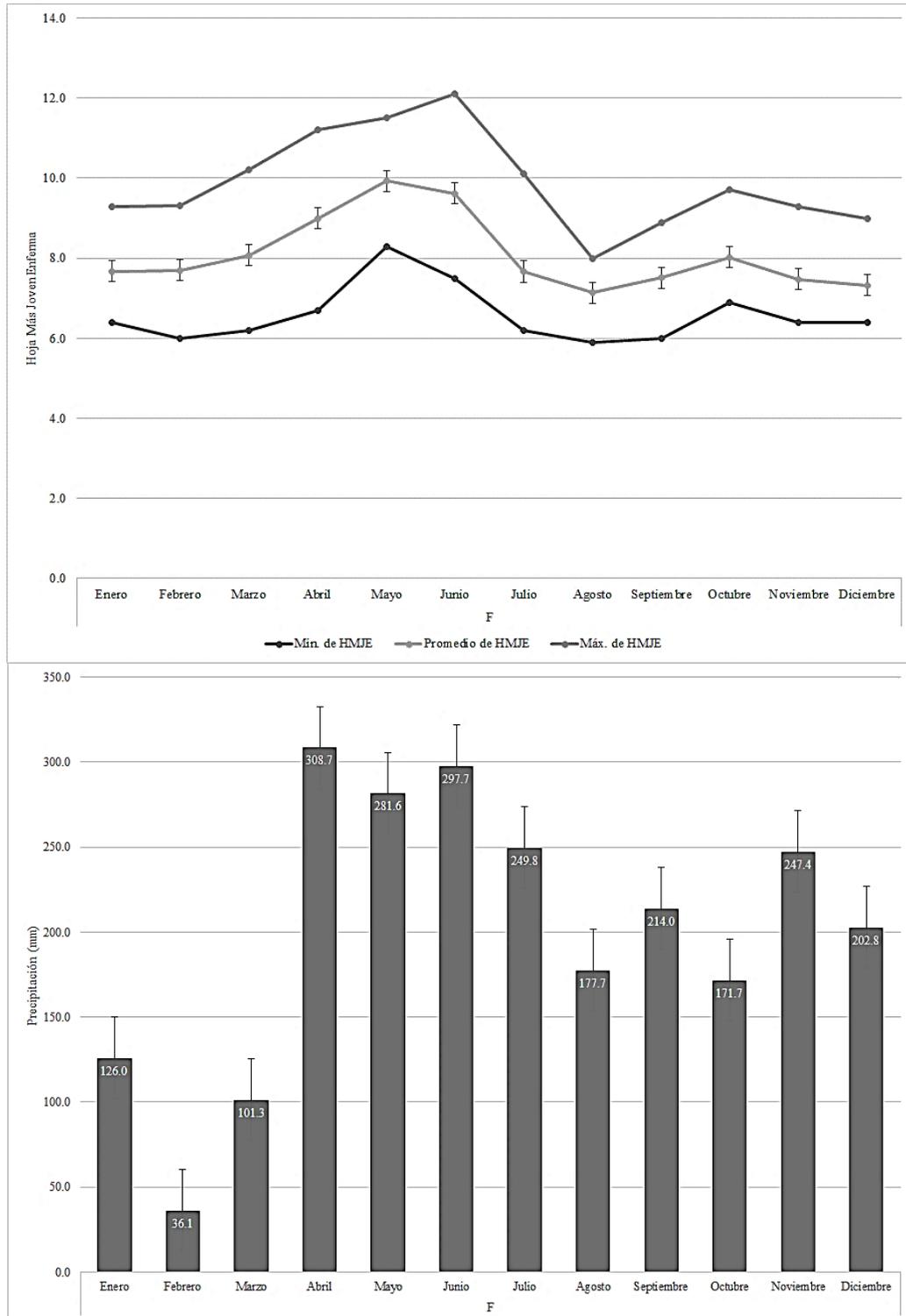


Figura 6-9: Dinámica temporal de la hoja más joven enferma y de la precipitación para la finca I, ubicada al sur de Turbo y norte de Apartadó.

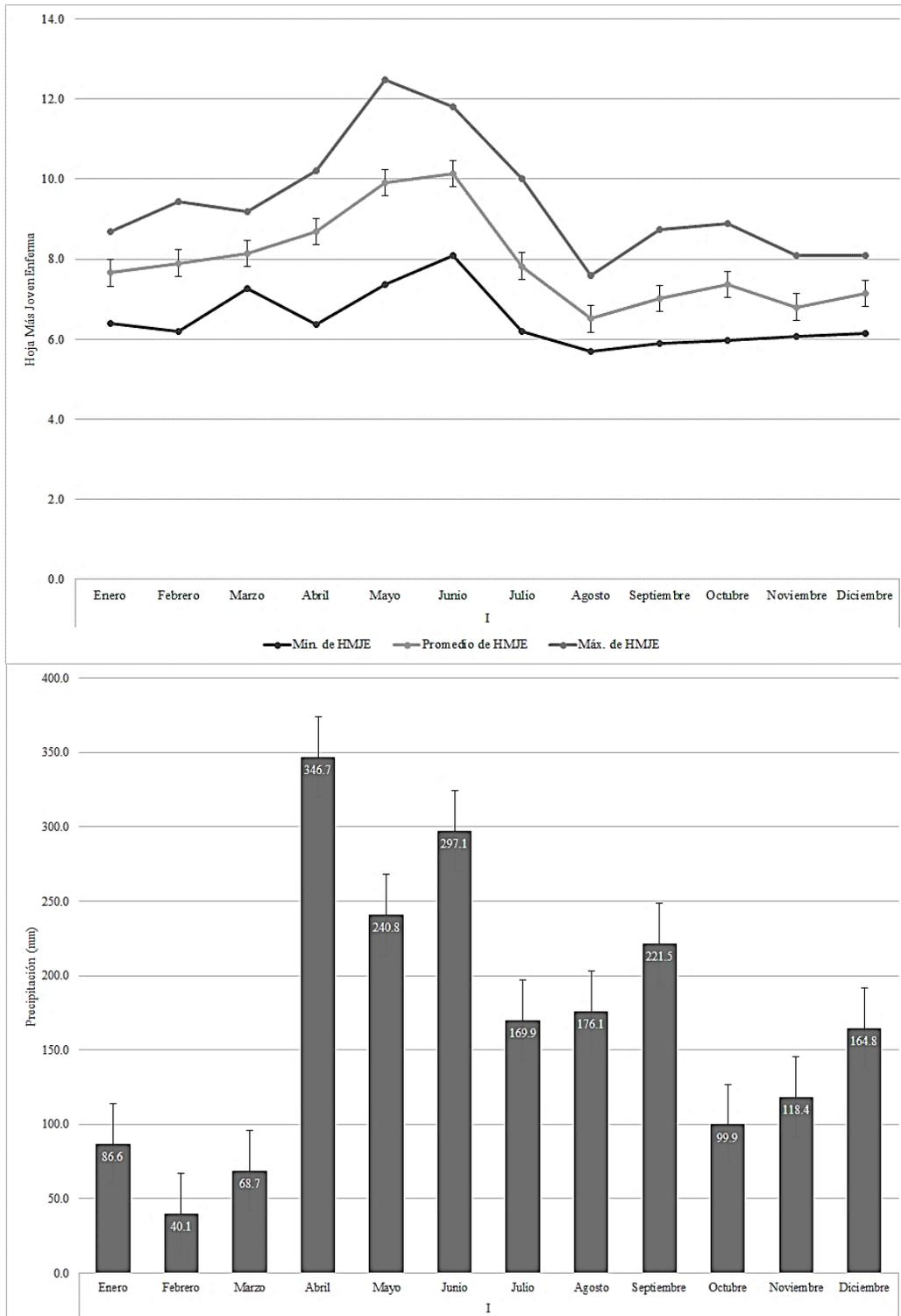
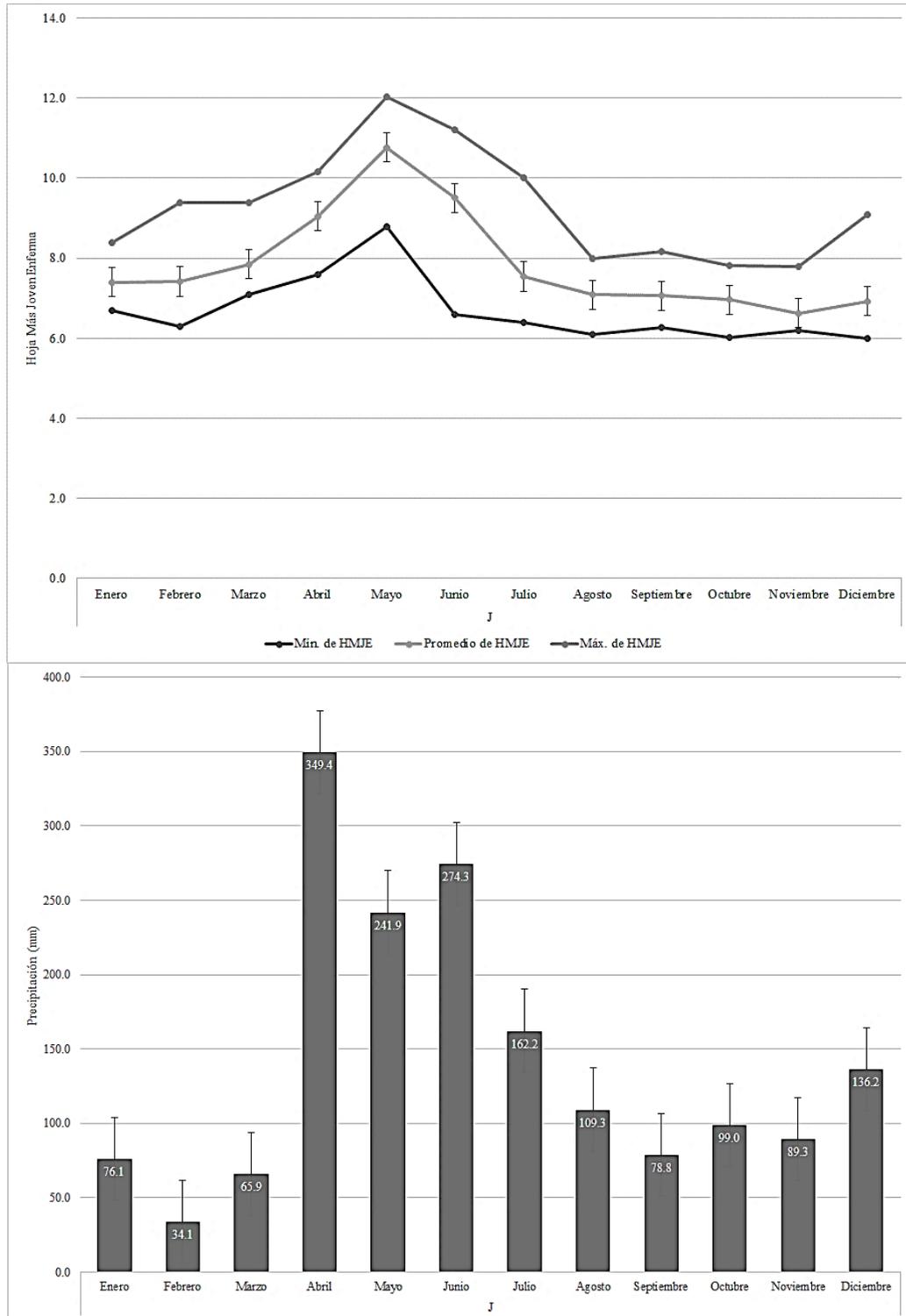


Figura 6-10: Dinámica temporal de la hoja más joven enferma y de la precipitación para la finca J, ubicada al sur de Turbo y norte de Apartadó.



Bibliografía

Aguirre Forero, S. E., Piraneque Gambasica, N. V. & Menjivar Flores, J. C. (2012). Relación entre las propiedades edafoclimáticas y la incidencia de Sigatoka negra (*Mycosphaerella fijiensis* Morelet) en la zona bananera del Magdalena-Colombia. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, 3(2), 13-25. Recuperado de <http://hemeroteca.unad.edu.co/revista1/index.php/riaa/article/view/970/953>

Aguirre, S. E., Piraneque, N. V. & Rodríguez, J. (2015). Relationship between the nutritional status of banana plants and Black Sigatoka severity in the Magdalena region of Colombia. *Agronomía Colombiana*, 33(3), 348-355. doi: <http://dx.doi.org/10.15446/agron.colomb.v33n3.51900>

Alfons, A. (2012). *cvTools: Cross-validation tools for regression models*. R package version 0.3.2. Recuperado de <https://cran.r-project.org/web/packages/cvTools>

Almeida, F. A., Barreto, M., Barbosa, J. C. y Costa, F. M. (2011). Distribuição espacial de *Phytophthora nicotianae* e reação de cultivares de cebola ao fungo. *Summa Phytopathologica*, 37(1), 13-17. doi: 10.1590/S0100-54052011000100002

Araújo e Silva Ferraz, G., Silva, F. M., Carvalho Alves, M., Lima Bueno, R. & Costa, P. A. N. (2012). Geostatistical analysis of fruit yield and detachment force in coffee. *Precision Agriculture*, 13(1), 76-89. doi: 10.1007/s11119-011-9223-8

Asociación de Bananeros de Colombia. (2016). Coyuntura Bananera 2015. AUGURA. Recuperado de <http://www.augura.com.co/wp-content/uploads/2015/08/CONYUNTURA-BANANERA-2015.pdf>

Barrera V., J., Barraza A., F. & Campo A., R. (2016). Efecto del sombrío sobre la Sigatoka negra (*Mycosphaerella fijiensis* Morelet) en cultivo de plátano cv Hartón (*Musa* AAB Simmonds). *Revista U.D.C.A. Actualidad & Divulgación Científica*, 19(2): 317-323.

Belalcázar C., S., Rosales, F. E. & Espinosa M., J. (2003). Altas densidades de siembra en plátano, una alternativa rentable y sostenible de producción. En: Rivas, G. y Rosales, F. (Eds.), Manejo convencional y alternativo de la Sigatoka negra, nematodos y otras plagas asociadas al cultivo de musáceas en los trópicos (55-63). Guayaquil: INIBAP y MUSALAC.

Bornacelly Horta, H. R. (2009). *Estudio del ciclo de vida de Mycosphaerella fijiensis en tres clones de banano (Musa AAA) en tres regiones de la Zona Bananera del Magdalena*. (Tesis de maestría, Universidad Nacional de Colombia Sede Palmira). Recuperado de <http://www.bdigital.unal.edu.co/716/1/8006001.2009.pdf>

Brun, J. (1963). "La Cercosporiose du bananier en Guinée." Étude de la phase ascosporee du *Mycosphaerella musicola* Leach. *Fruits*, 19(3), 125-131. Recuperado de http://agritrop.cirad.fr/457822/1/document_457822.pdf

Burt, P. J. A. (2002). Airborne dispersal of *Mycosphaerella fijiensis*. En Jacome, L., Lepoivre, P., Marin, D., Ortiz, R., Romero & Escalant, J. V. (Eds), *Mycosphaerella* leaf spot diseases of bananas: present status and outlook. Proceedings of the Workshop on *Mycosphaerella* leaf spot diseases (111-121). San José: The International Network for the Improvement of Banana and Plantain.

Cambardella, C. A., Moorman, T. B., Novak, J. M., Parkin, T. B., Karlen, D. L., Turco, R. F. & Konopka, A. E. (1994). Field-scale variability of soil properties in central Iowa soils. *Soil Science Society of America Journal*, 58(5), 1501-1511. doi: 10.2136/sssaj1994.03615995005800050033x

Carlier, J., Zapater, M. F., Lapeyre, F., Jones, D. R. & Mourichon, X. (2000). Septoria leaf spot of banana: A newly discovered disease caused by *Mycosphaerella eumusae*

(anamorph *Septoria eumusae*). *Phytopathology*, 90(8), 884-890. doi: 10.1094/PHYTO.2000.90.8.884

Carlier, J., Waele, D. y Escalant, J.V. (2002). Evaluación de la resistencia a las enfermedades de las manchas foliares causadas por *Mycosphaerella* spp. En: Vézina, A y Picq, C. (Eds.), Evaluación global de la resistencia de los bananos al marchitamiento por *Fusarium*, enfermedades de las manchas foliares causadas por *Mycosphaerella* y nematodos: Evaluación extensiva (15-20). *Guías técnicas INIBAP*, 6. Montpellier: Red Internacional para el Mejoramiento del Banano y Plátano.

Carlier, J. (2004). Population genetic structure and dispersal of *Mycosphaerella fijiensis*. *InfoMusa*, 13(2), 17-20.

Castelan, F.P., Saraiva, L.A., Lange, F., Lapeyre de Bellaire, L., Cordenunsi, B.R. y Chillet, M. (2012). Effects of Black Leaf Streak Disease and Sigatoka Disease on fruit quality and maturation process of bananas produced in the subtropical conditions of southern Brazil. *Crop Protection*, 35, 127-137. doi: 10.1016/j.cropro.2011.08.002

Chellemi, D. O., Rohrbach, K. G., Yost, R. S. & Sonoda, R. M. (1988). Analysis of the spatial pattern of plant pathogens and diseased plants using geostatistics. *Phytopathology*, 78(2), 221-226. doi: 10.1094/Phyto-78-221

Chica Ramírez, H. A., Peña Quiñones, A. J., Giraldo Jiménez, J. F., Obando Bonilla D. y Riaño Herrera, N. M. (2014). SueMulador: Herramienta para la simulación de datos faltantes en series climáticas diarias de zonas ecuatoriales. *Revista Facultad Nacional de Agronomía*, 67(2), 7365-7373. doi: 10.15446/rfnam.v67n2.44179

Chillet, M., Abadie, C., Hubert, O., Chilin-Charles, Y. & Lapeyre de Bellaire, L. (2009). Sigatoka disease reduces the greenlife of bananas. *Crop Protection*, 28(1), 41-45. doi: 10.1016/j.cropro.2008.08.008

Chuang, T. Y. & Jeger, M. J. (1987). Predicting the rate of development of black Sigatoka (*Mycosphaerella fijiensis* var. *difformis*) disease in southern Taiwan. *Phytopathology*, 77(11), 1542-1547. doi: 10.1094/Phyto-77-1542

Churchill, A. C. L. (2011). *Mycosphaerella fijiensis*, the black leaf streak pathogen of banana: progress towards understanding pathogen biology and detection, disease development, and the challenges of control. *Molecular Plant Pathology*, 12(4), 307-328. doi: 10.1111/j.1364-3703.2010.00672.x

Coakley, S. M., Boyd, W. S. & Line, R. F. (1982). Statistical models for predicting stripe rust on winter wheat in the Pacific Northwest. *Phytopathology*, 72(12), 1539-1542. doi: 10.1094/Phyto-72-1539

Costa, L. C., Jesús Junior, W. C. & Ribeiro do Vale. (2002). Modelos aplicados en fitopatología. *Revista de la Facultad de Ciencias Agrarias*, 34(1), 81-92. Recuperado de <http://bdigital.uncu.edu.ar/3039>

Daub, M. E. & Chung, K.-R. (2007). Cercosporin: A photoactivated toxin in plant disease. APSnet Features. APS. doi: 10.1094/APSnetFeature/2007-0207

Diggle, P. J. & Ribeiro, P. J. (2007). Gaussian models for geostatistical data. En: Diggle, P. & Ribeiro, P. J. *Model-based geostatistics* (pp. 46-78). New York: Springer-Verlag. doi: 10.1007/978-0-387-48536-2

Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2016). FAOSTAT statistics database. Rome: FAO.

Fouré, E. (1985). La maladie des raies noires des bananiers et des plantains (*Mycosphaerella fijiensis* Morelet). Etude comparée des différents symptômes et stades de la maladie au Gabon. Paris: CIRAD-IRFA.

Fouré, E. & Mouliom P., A. (1988). La cercosporiose noire des bananiers et des plantains au Cameroun (*Mycosphaerella fijiensis*). Contribution à l'étude des premières phases de l'infection parasitaire. Mise au point de test précoces d'inoculation sur plants issus de vitro-culture. *Fruits*, 43(6): 339 -348.

Fouré, E. & Ganry, J. (2008). A biological forecasting system to control Black Leaf Streak disease of bananas and plantains. *Fruits*, 63(5), 311-317. doi: 10.1051/fruits:2008029

Freitas, A. S. (2013). *Sigatoka-amarela da bananeira em função da nutrição mineral em solução nutritiva e da distribuição espacial da fertilidade do solo*. (Dissertação Mestre, Universidade Federal de Lavras). Recuperado de http://repositorio.ufra.br/bitstream/1/723/3/DISSERTACAO_Sigatoka-amarela%20da%20bananeira%20....pdf

Freitez T., J. A., Ablan B., M. & Gómez, C. (2009). Propuesta de modelos predictivos del brote de la Sigatoka Negra para las plantaciones de plátano al sur del lago de Maracaibo, Venezuela. *Revista UDO Agrícola*, 9(1), 191-198. Recuperado de <http://www.bioline.org.br/pdf?cg09026>

Freitez, J., Ablan, M. & Gómez-Cárdenas, C. (2010). *Propuesta de modelos predictivos del brote de Sigatoka Negra para plátano al sur del lago de Maracaibo, Venezuela*. En García E., N. L. & Mira C., J. J. (Eds.), XIX Reunión Internacional ACORBAT 2010 (85-90). Medellín: Asociación de Bananeros de Colombia AUGURA.

Gallardo, A. (2006). Geostadística. *Ecosistemas*, 3, 1-11. Recuperado de <https://fjferreer.webs.ull.es/Bibliog/Biblio/Geoestadistica.pdf>

Ganry, F. (1978). Calcul des “sommés de vitesses de développement” et des températures moyennes journalières à partir du minimum et du maximum journaliers de température, sous climats tropical et équatorial. *Fruits*, 33(4), 221-236.

Ganry, J. (1979). Quelques précisions concernant l'action de la température sur la vitesse de développement de la Cercosporiose du bananier. Conséquences pour l'application à l'avertissement. *Fruits*, 34(4), 235-244.

Gasparotto, L., Pereira, J. C. R., Urben, A. F., Hanada, R.E. & Pereira, M. C. N. (2005). *Heliconia psittacorum*: hospedeira de *Mycosphaerella fijiensis*, agente causal da sigatoka-negra da bananeira. *Fitopatologia Brasileira*, 30(4), 423-425. doi: 10.1590/S0100-41582005000400016

Gastwirth, J. L., Gel., Y. R., Wallace Hui, W. L., Lyubchich, V., Miao, W. & Noguchi, K. (2015). lawstat: Tools for biostatistics, public policy, and law. R package version 3.0. Recuperado de <https://CRAN.R-project.org/package=lawstat>

Gauhl, F. (1994). *Epidemiology and ecology of Black Sigatoka (Mycosphaerella fijiensis Morelet) on plantain and banana (Musa spp.) in Costa Rica, Central America*. Montpellier: International Network for the Improvement of Banana and Plantain.

Guarín Giraldo, G. W. (2011). *Impacto de la variabilidad climática en la producción de banano en el Urabá antioqueño*. (Tesis de maestría, Universidad Nacional de Colombia Medellín). Recuperado de <http://www.bdigital.unal.edu.co/4643/>

Guzmán, M. (2003). Epidemiología de la Sigatoka negra y el sistema de preaviso biológico. En: Rivas, G. y Rosales, F. (Eds.), Manejo convencional y alternativo de la Sigatoka negra, nematodos y otras plagas asociadas al cultivo de musáceas en los trópicos (25-26). Guayaquil: INIBAP y MUSALAC.

Hernández G., L., Hidalgo, W., Linares, B., Hernández, J., Romero N. & Fernández, S. (2005). Estudio preliminar de vigilancia y pronóstico para Sigatoka negra (*Mycosphaerella fijiensis* Morelet) en el cultivo de plátano (*Musa AAB* cv Hartón) en Macagua-Jurimiquire, estado Yaracuy. *Revista de la Facultad de Agronomía*, 22(4), 325-339. Recuperado de http://www.scielo.org.ve/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0378-78182005000400002

Hernández F., J. B., Sanabria, N., Blanco, G., Linares, B., Milla, M. & Pérez, A. (2009). Predicción de Sigatoka negra en “Plátano Hartón” bajo condiciones de fertilización del suelo en el municipio Veroes del Estado Yaracuy, Venezuela. *Agronomía Tropical*, 59(3), 317-322. Recuperado de <http://www.scielo.org.ve/pdf/at/v59n3/art08.pdf>

Hidalgo, M., Tapia, A., Rodríguez, W. & Serrano, E. (2006). Efecto de la Sigatoka negra (*Mycosphaerella fijiensis*) sobre la fotosíntesis y transpiración foliar del banano (*Musa* sp. AAA, cv. Valery). *Agronomía Costarricense*, 30(1), 35-41. Recuperado de <http://revistas.ucr.ac.cr/index.php/agrocost/article/view/6829/6516>

Hoss, R., Helbig, J. & Bochow, H. (2000). Function of host and fungal metabolites in resistance response of banana and plantain in the Black Sigatoka Disease pathosystem (*Musa* spp. – *Mycosphaerella fijiensis*). *Journal of Phytopathology*, 148(7-8), 387-394. doi: 10.1046/j.1439-0434.2000.00530.x

Hoyos-Carvajal, L., Salazar, E. & Mira, J. J. (2006). *Ciclo de vida de Mycosphaerella fijiensis en Urabá, Colombia*. En Soprano, E., Tcacenco, F. A., Lichtemberg, L. A. & Silva, M. C. (Eds.), XVII Reunión Internacional ACORBAT 2006. Bananos: Un negocio sustentable (653-655). Joinville: ACORBAT/ACAFRUTA.

Instituto Geográfico Agustín Codazzi, Subdirección de Agrología. (2007). *Estudio semidetallado de suelos de las áreas potencialmente agrícolas, Urabá, Departamento de Antioquia*. Bogotá: Imprenta Nacional de Colombia.

Kema, G. H. J. (2006). *The pesticide reduction plan for banana*. En Soprano, E., Tcacenco, F. A., Lichtemberg, L. A. & Silva, M. C. (Eds.), XVII Reunión Internacional ACORBAT 2006. Bananos: Un negocio sustentable (3-4). Joinville: ACORBAT/ACAFRUTA.

Kerry, R. & Oliver, M. A. (2007). Comparing sampling needs for variograms of soil properties computed by the method of moments and residual maximum likelihood. *Geoderma*, 140(4), 383-396. doi: 10.1016/j.geoderma.2007.04.019

Landry, C., Bonnot, F., Ravigne, V., Carlier, J., Vaillant, J. & Abadie, C. (2013). Simulation model of a tropical foliar epidemic disease at plant scale: Case of Black Sigatoka on banana. *Biomath Communications*. doi: 10.11145/93

Marín, D. H., Romero, R. A., Guzmán, M. & Sutton, T. B. (2003). Black Sigatoka: An increasing threat to banana cultivation. *Plant Disease*, 87(3), 208-222. doi: 10.1094/PDIS.2003.87.3.208

Martínez G., A. (2003). Uso de la agroforestería para disminuir la severidad de la Sigatoka negra (*Mycosphaerella fijiensis*) en el cultivo del plátano (*Musa* AAB, Simmonds). En: Rivas, G. y Rosales, F. (Eds.), Manejo convencional y alternativo de la Sigatoka negra,

nematodos y otras plagas asociadas al cultivo de musáceas en los trópicos (67-76). Guayaquil: INIBAP y MUSALAC.

Martínez, E., Buriticá, P., Ochoa, A. & Mira, J. J. (2010). *Influencia del enso sobre la Sigatoka negra en banano en Urabá (Colombia) durante 2007-2010*. En García E., N. L. & Mira C., J. J. (Eds.), XIX Reunión Internacional ACORBAT 2010 (121-124). Medellín: Asociación de Bananeros de Colombia AUGURA.

Mayorga P., M. H. (1990). La roya negra (*Mycosphaerella fijiensis* Morelet) del plátano y del banano. I. Ciclo de vida del patógeno bajo las condiciones del Urabá. *Revista ICA*, 25(2), 69-77.

Mendiburu, F. (2016). agricolae: Statistical procedures for agricultural research. R package version 1.2-4. Recuperado de <https://CRAN.R-project.org/package=agricolae>

Moreira Leal, R., Barbosa, J. C., Gregolin Costa, M., Belasque Junior, J., Takao Yamamoto, P. & Dragone, J. (2010). Distribuição espacial de Huanglongbing (greening) em citros utilizando a geoestatística. *Revista Brasileira de Fruticultura*, 32(3), 808-818. doi: 10.1590/S0100-29452010005000077

Mourichon, X. & Zapater, M.F. (1990). Obtention *in vitro* du stade *Mycosphaerella fijiensis*, forme parfaite de *Cercospora fijiensis*. *Fruits*, 45(6): 553 – 557.

NOAA / National Weather Service. *Cold & Warm Episodes by Season*. Maryland: U. S. Climate Prediction Center Internet Team. Recuperado de http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ensoyears.shtml

Ochoa, A., Álvarez, P., Poveda, G., Buriticá, P. & Mira, J. J. (2012). *Climatic forcing on Black Sigatoka Disease of banana crops in Urabá, Colombia*. En 2012 Fall Meeting. San Francisco: AGU. Recuperado de <http://abstractsearch.agu.org/meetings/2012/FM/B11C-0449.html>

Orozco-Santos, M., Orozco-Romero, J., Pérez-Zamora, O., Manzo-Sánchez, G., Farías-Larios, J. & Silva M., W. (2008). Prácticas culturales para el manejo de la Sigatoka negra en bananos y plátanos. *Tropical Plant Pathology*, 33(3), 189-196. doi: 10.1590/S1982-56762008000300003

Patiño Hoyos, L. F. (2000). Efecto de las condiciones climáticas sobre el desarrollo de la Sigatoka Negra. *Revista Augura*, 20(1), 42-49.

Perez, L. (1980). Morfología, distribución, aspectos bioecológicos y lucha contra *Mycosphaerella musicola* Leach, agente causal de la mancha de la hoja (Sigatoka) del plátano (*Musa spp.*). (Tesis de doctorado, Instituto Superior de Ciencias Agropecuarias de la Habana).

Pérez, L. & Mauri, F. (1992). Efecto de la temperatura sobre la velocidad del crecimiento de (*Mycosphaerella fijiensis*) "In vitro". Determinación de la temperatura cardinal para el crecimiento del patógeno. (Informe final 003.14.11). La Habana: Instituto de Investigaciones de Sanidad Vegetal.

Pérez-Vicente, L., Mauri-Mollera, F., Hernández-Mancilla, A., Abreu-Antúnez, E. & Porras-González, A. (2000). Epidemiología de la Sigatoka negra (*Mycosphaerella fijiensis* Morelet) en Cuba. I. Pronóstico bioclimático de los tratamientos de fungicidas en bananos (*Musa acuminata* AAA). *Revista Mexicana de Fitopatología*, 18(1), 15-26. Recuperado de: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=61218103>

Pérez V., L. (2006). *Manejo alternativo de la Sigatoka negra causada por Mycosphaerella fijiensis Morelet en bananos y plátanos*. En Soprano, E., Tcacenco, F. A., Lichtemberg, L. A. & Silva, M. C. (Eds.), XVII Reunión Internacional ACORBAT 2006. Bananos: Un negocio sustentable (141-152). Joinville: ACORBAT/ACAFRUTA.

Porras, A. & Pérez, L. (1993). Método para el cálculo de las sumas de velocidades de desarrollo para el pronóstico bioclimático de los tratamientos contra Sigatoka negra (*Mycosphaerella fijiensis*) y amarilla (*M. musicola* Leach ex Mulder) a partir de la temperatura máxima y mínima diaria. En. (Eds.), VII Forum de Ciencia y Técnica. La Habana.

R Core Team (2016) *R: A language and environment for statistical computing*. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. Recuperado de <https://www.R-project.org/>.

Ramírez, J. F., González, A., Sánchez, J. R. & León, C. (2011). Modelización y generación de mapas del comportamiento espacial de *Sporisorium reilianum* ((Kühn) Langdon y Fullerton) en Estado de México, México. *Revista de la Facultad de Ciencias Agrarias*, 43(2), 157-173. Recuperado de: http://revista.fca.uncu.edu.ar/images/stories/pdfs/2011-02/T43_2_13_Ram%C3%ADrez.pdf

Rey V., V. & Mira C., J. J. (2010). *Evolución del manejo químico de Sigatoka negra de una finca bananera de Urabá (Colombia)*. En García E., N. L. & Mira C., J. J. (Eds.), XIX Reunión Internacional ACORBAT 2010 (570-571). Medellín: Asociación de Bananeros de Colombia AUGURA.

Rey V., V. (2012, febrero). Consideraciones sobre la interpretación y la utilidad de la información climática con referencia al fenómeno ENSO. *Boletín Técnico Cenibanano*, 1, 1-9.

Ribeiro Jr, P. J. & Diggle, P. J. (2016). *geoR: Analysis of geostatistical data*. R package version 1.7-5.2. Recuperado de <https://CRAN.R-project.org/package=geoR>

Rivera Hernández, J. F. (2004). *Estudio del desarrollo de la epidemia de Sigatoka negra (Mycosphaerella fijiensis M. Morelet) en el cultivo de plátano en Urabá, Antioquia – Colombia y su relación con factores climáticos*. (Tesis inédita de pregrado). Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia.

Rocha Júnior, O. M., Saraiva Câmara, M. P., Michereff, S. J., de-Oliveira, M. J., Mora-Aguilera, G. & Ruíz-García, N. (2010). Caracterización espacial de la Sigatoka amarilla del banano e implicaciones en el muestreo. *Agrociencia*, 44(3), 351-361. Recuperado de <http://www.scielo.org.mx/pdf/agro/v44n3/v44n3a9.pdf>

Rodríguez-Gaviria, P. A. & Cayón, G. (2008). Efecto de *Mycosphaerella fijiensis* sobre la fisiología de la hoja de banano. *Agronomía Colombiana*, 26(2), 256-265. Recuperado de <http://www.revistas.unal.edu.co/index.php/agrocol/article/view/13504/14193>

Roldan, P. (2008). *Modelamiento del patrón de circulación de la bahía Colombia. Golfo de Urabá. Implicaciones para el transporte de sedimentos*. (Tesis de maestría, Universidad Nacional de Colombia Medellín).

Romero, M., Díaz, T., Castañeda, D. & Arango, R. (1999). Diagnóstico por PCR del complejo Sigatoka en Colombia. *Revista Facultad Nacional de Agronomía*, 52(1), 425-434. Recuperado de <http://www.revistas.unal.edu.co/index.php/refame/article/view/23761/24443>

Salazar Molina, C.A. (2012). *El drenaje agrícola en el cultivo del banano: Aplicado a las zonas bananeras de Colombia*. Saarbrücken: Editorial Académica Española.

Sanchez-Pale, J. R., Ramirez-Davila, J. F., Gonzalez-Huerta, A. & Leon, C. (2011). Modelization of the spatial distribution of corn head smut (*Sporisorium reilianum* Langdon and Fullerton) in Mexico. *Spanish Journal of Agricultural Research*, 9(3), 882-893. doi: 10.5424/sjar/20110903-277-10

Sepulveda, L., Vásquez, L.E., Paniagua, C.I., Hernández, C. & Arango, R. (2006). *Efecto del tipo de luz y otros factores sobre el desarrollo asexual de Mycosphaerella fijiensis*. En Soprano, E., Tcacenco, F. A., Lichtemberg, L. A. & Silva, M. C. (Eds.), XVII Reunión Internacional ACORBAT 2006. Bananos: Un negocio sustentable (735-737). Joinville: ACORBAT/ACAFRUTA

Smith, M.C., Rutter, J., Burt, P.J.A., Ramirez, F. & Gonzalez O., E.H. (1997). Black Sigatoka disease of banana: spatial and temporal variability in disease development. *Annals of Applied Biology*, 131(1), 63-77.

Stover, R.H. (1965). Leaf spot of bananas caused by *Mycosphaerella musicola*: Effect of temperature on germination, hyphal growth, and conidia production. *Tropical Agriculture*, 42(4): 351 - 360.

Stover, R.H. (1968). Leaf spot of bananas caused by *Mycosphaerella musicola*: Perithecia and sporodochia production in different climates. *Tropical Agriculture*, 45(1): 1-12.

Stover, R.H. (1971). A proposed international scale for estimating intensity of banana leaf spot (*Mycosphaerella musicola* Leach). *Tropical Agriculture*, 48(3): 185-196

Stover, R.H. (1980). Estimation of losses by Sigatoka disease of bananas. En Chiarappa, L. (Ed.), Crop loss assessment methods. FAO Manual on the evaluation and prevention of losses by pests, disease and weeds. Edinburgh: FAO and CAB.

Torres Aponte, W. S., Castañeda, D & Cayón, D. G. (2006). *Aproximación a la distribución de la Sigatoka negra Mycosphaerella fijiensis Morelet, y su relación con algunos factores agronómicos*. (Tesis inédita de pregrado). Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia.

Torres, J. M., Calderón, H., Rodríguez-Arango, Morales, J. G. & Arango, R. (2012). Differential induction of pathogenesis-related proteins in banana in response to *Mycosphaerella fijiensis* infection. *European Journal of Plant Pathology*, 133(4), 887-898. doi: 10.1007/s10658-012-0012-7

Uchôa, C. N., Pozza, E. A., Pozza, A. A. A. & Moraes, W. S. (2011). Modelagem geoestatística da Sigatoka-negra e sua relação com a fertilidade do solo. *Bioscience Journal*, Uberlândia, 27(3), 357-362. Recuperado de <http://www.seer.ufu.br/index.php/biosciencejournal/article/view/7504/7550>

Venables, W. N. & Ripley, B. D. (2002). *Modern Applied Statistics with S*. New York: Springer-Verlag.

Zucoloto, M., Souza Lima, J. S. & Coelho, R. I. (2009). Uso da geoestatística na probabilidade de ocorrência do Mal-do-Panamá em bananeira Prata Anã. *Revista Facultad Nacional de Agronomía*, 62(1), 4793-4796. Recuperado de <http://www.revistas.unal.edu.co/index.php/refame/article/view/24877/25409>