

Análisis espacio-temporal y detección de focos de pudrición de cogollo en ASOPALMAR
(Cesar): un enfoque mediante geolocalización con datos parciales

Carolina Duque Solano y Ludy Ovallos Gaona

Trabajo de Grado para optar el título de Especialista en Estadística

Director

Dagoberto Bermúdez Rubio

Magister en Ciencias - Estadística

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingeniería Físico-mecánicas

Escuela de Matemáticas

Especialización en Estadística

Bucaramanga

2026

Agradecimientos

Agradecemos a la Asociación de Palmeros de San Martín Cesar (ASOPALMAR) por su disposición, acompañamiento y apoyo constante durante el desarrollo de este proyecto. Su colaboración fue fundamental para el acceso a la información, la comprensión del contexto productivo y sanitario del cultivo de palma de aceite, y para la validación técnica de los resultados obtenidos.

De igual forma, expresamos nuestro sincero agradecimiento al director del proyecto, por su orientación académica, acompañamiento permanente y valiosos aportes metodológicos. Su experiencia, compromiso y rigor fueron determinantes para el fortalecimiento del enfoque estadístico y la correcta estructuración del trabajo, contribuyendo de manera significativa a la calidad final del estudio.

Tabla de Contenido

	Pág.
Introducción	17
1. Planteamiento del problema.....	19
1.1 Contexto y justificación	19
1.2 Problema central	23
1.3 Preguntas de investigación.....	23
2. Objetivos.....	24
2.1 Objetivo general.....	24
2.2 Objetivos específicos	24
3. Marco de referencia	25
3.1 Marco teórico.....	25
3.1.1 Epidemiología vegetal aplicada a la Pudrición de Cogollo	25
3.1.2 Métricas epidemiológicas para datos de censo geolocalizado	26
3.1.3 Control estadístico de procesos en el monitoreo fitosanitario	27
3.1.4 Análisis espacial y autocorrelación.....	27
3.1.5 Modelos de supervivencia aplicados a datos agrícolas.....	30
3.2 Marco conceptual.....	30
3.3 Estado del arte.....	34
4. Marco metodológico	37
4.1 Diseño de investigación	37
4.2 Población y muestra.....	38

4.3 Variables de estudio.....	40
4.3.1 Variables a nivel evento / palma (datos CyberTracker).....	41
4.3.2 Variables agregadas a nivel predio–mes.....	41
4.3.3 Indicadores principales (variables respuesta)	43
4.3.4 Variables espaciales para inferencia (Moran y LISA).....	43
4.4 Marco legal	44
4.4.1 Legislación general sobre protección de datos personales en Colombia.....	44
4.4.2 Normatividad sobre manejo de información en el sector agrícola	46
4.4.2.1 Ley de transparencia y datos abiertos.	46
4.4.2.2 Lineamientos del ICA sobre uso y confidencialidad de la información estadística.	46
4.4.3 Normatividad técnica del ICA relativa al sector agropecuario	47
4.5 Técnicas de análisis.....	48
4.5.1 Enfoque general del análisis espacio-temporal.....	48
4.5.2 Preprocesamiento espacio-temporal	49
4.5.2.1 Agregación temporal.....	49
4.5.2.2 Construcción de geometrías espaciales.....	49
4.5.2.3 Consolidación del GeoDataFrame base.....	49
4.5.2.4 Definición de la métrica comparable entre predios.	50
4.5.3 Cálculo de índices de autocorrelación espacial	50
4.5.3.1 Índice global de Moran (I).....	50
4.5.3.2 Decisión metodológica.....	51
4.5.4 Indicadores locales de asociación espacial (LISA).....	51
4.5.5 Herramientas tecnológicas.....	52

4.6 Definición de vecindad y pesos espaciales	52
4.7 Autocorrelación espacial.....	53
4.8 Persistencia de focos.....	54
4.9 Sensibilidad y validación	54
4.10 Limitaciones de estudio	55
4.10.1 Distancia entre polígonos.....	55
4.10.2 Limitaciones asociadas a la cobertura espacial de la información censal	57
5.5 Plan de Trabajo	59
6. Resultados esperados	60
6.1 Resultados del análisis espacial	61
6.2 Alcances y limitaciones	62
7. Productos esperados.....	62
8. Recursos y cronograma.....	63
8.1 Recursos.....	63
9. Justificación técnica.....	64
10. Cronograma simplificado.....	65
11. Resultados.....	66
11.1 Implementación de la herramienta de captura y origen de la información.....	66
11.2 Descripción y delimitación del área de estudio por zonas productivas	71
11.3 Intensidad de seguimiento: promedio de visitas por palma	72
11.4 Cobertura del monitoreo fitosanitario y esfuerzo de muestreo.....	73
11.5 Estimación del porcentaje de palmas enfermas	80
11.6 Cálculo y análisis de enfermedades fitosanitarias específicas.....	85

11.7 Tendencia temporal de las enfermedades en el cultivo de palma.....	89
11.8 Justificación enfoque centrado en pudrición de cogollo.....	92
11.8.1 Distribución espacial de la intensidad de Pudrición de Cogollo en el área de estudio.....	93
11.8.2 Tendencia temporal de las enfermedades en el cultivo de palma.....	98
11.8.3 Análisis de casos anteriores y nuevos de pc.....	100
11.8.2.1 Análisis de predios visitados durante todo el año.....	101
11.9 Análisis espacial detallado de tres predios prioritarios para comportamiento de la enfermedad.....	103
11.10 Análisis de autocorrelación espacial mediante el Índice de Moran.....	109
11.10.1 Justificación del análisis espacial.....	109
11.10.2 Consideraciones espaciales del sistema de predios.....	109
11.10.3 Elección del Índice de Moran.....	110
11.10.4 Definición de la matriz de pesos espaciales.....	111
11.10.5 Enfoque espacio-temporal del análisis.....	111
11.10.6 Alcance e interpretación de los resultados.....	112
11.10.7 Relevancia para la gestión fitosanitaria.....	112
11.11 Resultados del análisis de autocorrelación espacial.....	113
11.11.1 Índice global de Moran.....	113
11.12 Indicadores locales de asociación espacial (LISA).....	116
11.13 Indicadores locales de asociación espacial (LISA).....	117
12. Conclusiones.....	122
12.1 Conclusión general.....	122
12.2 Conclusiones específicas.....	123

12.2.1 Construcción de la base geoespacial.....	123
12.2.2 Comportamiento temporal de la enfermedad durante 2025.....	123
12.2.3 Cálculo de la intensidad mensual normalizada.....	124
12.2.4 Autocorrelación espacial global (Moran)	124
12.2.5 Autocorrelación espacial local (LISA)	124
12.2.6 Persistencia de hotspots y ranking de predios críticos.....	125
12.2.7 Sensibilidad del esquema de vecindad.....	125
12.3 Conclusión integradora	125
13 Recomendaciones	127
13.1 Revisión y control de la calidad de la información censal.....	127
13.2 Parametrización y validación de los resultados	127
13.3 Automatización de los procesos de análisis.....	128
13.4 Construcción de patrones integrales de revisión de datos	128
13.5 Incorporación de análisis espectral e imágenes multiespectrales	129
13.6 Ampliación de estudios en detección remota.....	129
13.7 Diseño e implementación de modelos estadísticos.....	129
Referencias Bibliográficas	131

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1. Distribución geográfica por zonas principales (Norte, Oriental, Central y Suroccidental) de los cultivos de palma africana en Colombia (2024).....	20
Tabla 2. Variables exportadas por Cybertracker.....	41
Tabla 3. Cronograma	65
Tabla 4. Tabla exportada por Cybertracker en formato .xlsx	67
Tabla 5. Datos exportados por el software Cybertracker.....	69
Tabla 6. Distribución por hectárea (Ha) de cada zona administrativa.....	71
Tabla 7. Clasificación de visitas por palmas únicas y registros.....	73
Tabla 8. Número de predios visitados por zona y mes	74
Tabla 9. Porcentaje estimado de palmas enfermas	81
Tabla 10. Censo de enfermedades por registro y porcentaje de afectación.....	86
Tabla 11. Pareto de enfermedades (acumulado).....	87
Tabla 12. Porcentaje de reincidencia de la enfermedad.....	91
Tabla 13. Tendencia temporal de Pudrición de Cogollo.....	98
Tabla 14. Relaciones de caos nuevos y reincidentes	100
Tabla 15. Tendencia mensual	101
Tabla 16. Estimación predio A, hectareaje 9, palmas sembradas estimadas 1503	104
Tabla 17. Estimación predio E, hectareaje 10, palmas sembradas estimadas 1670.....	106
Tabla 18. Resumen de los valores índice junto con los niveles de significancia estadística obtenidos mediante permutaciones aleatorias.....	113

Tabla 19. Distribución mensual de los clústeres LISA por tipo de asociación espacial..... 116

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1. Localización del área de estudio y predios monitoreados	40
Figura 2. Delimitación del área de estudio y distribución espacial de los predios	56
Figura 3. Vista de distribución mayoritaria de predios sujetos de censo.....	57
Figura 4. Distribución espacial de los predios censados y áreas no censadas	58
Figura 5. Visualización de los datos recogidos a través de la herramienta Cybertracker.....	69
Figura 6. Mapa de calor, predios visitados	75
Figura 7. Gráfico de líneas, predios visitados periodo anual.....	76
Figura 8. Esfuerzo global de monitoreo por mes	77
Figura 9. Boxplot comparativo de distribución y variabilidad de visitas	78
Figura 10. Porcentaje mensual de palmas enfermas vs. esfuerzo de muestreo (predios visitados).....	79
Figura 11. Tendencia mensual de palmas enfermas	83
Figura 12. Pareto.....	88
Figura 13. Tendencia temporal de Enfermedades críticas	89
Figura 14. Distribución espacial de la intensidad de Pudrición de Cogollo (intensidad_pc_x100) en los predios evaluados.	94
Figura 15. Distribución espacial de la intensidad de Pudrición de Cogollo (intensidad_pc_x100) en los predios evaluados. (Vista 1)	95
Figura 16. Distribución espacial de la intensidad de Pudrición de Cogollo (intensidad_pc_x100) en los predios evaluado (Vista 2).....	96

Figura 17. Distribución espacial de la intensidad de Pudrición de Cogollo (intensidad_pc_x100) en los predios evaluado (Vista 3).....	97
Figura 18. Distribución espacial de la intensidad de Pudrición de Cogollo (intensidad_pc_x100) en los predios evaluados (Vista 4)	97
Figura 19. Distribución espacial de la intensidad de Pudrición de Cogollo (intensidad_pc_x100) en los predios evaluados (Vista 5)	98
Figura 20. Tendencia temporal de pudrición de cogollo	99
Figura 21. Tendencia mensual de la tasa de eventos de Pudrición de Cogollo por 1.000 palmas observadas (predios con cobertura completa).....	102
Figura 22. Estimación predio A (Enero), hectareaje 9, palmas sembradas estimadas 1503.....	105
Figura 23. Estimación predio E, hectareaje 10, palmas sembradas estimadas 1670	107
Figura 24. Moran Scatterplot de la intensidad de Pudrición de Cogollo en los predios evaluados – junio de 2025.....	115
Figura 25. Clústeres espaciales de la intensidad de Pudrición de Cogollo identificados mediante el análisis de Indicadores Locales de Asociación Espacial (LISA). (Vista General)	118
Figura 26. Clústeres espaciales de la intensidad de Pudrición de Cogollo identificados mediante el análisis de Indicadores Locales de Asociación Espacial (LISA). (Vista 1).....	119
Figura 27. Clústeres espaciales de la intensidad de Pudrición de Cogollo identificados mediante el análisis de Indicadores Locales de Asociación Espacial (LISA). (Vista 2).....	120
Figura 28. Clústeres espaciales de la intensidad de Pudrición de Cogollo identificados mediante el análisis de Indicadores Locales de Asociación Espacial (LISA). (Vista 3).....	121
Figura 29. Clústeres espaciales de la intensidad de Pudrición de Cogollo identificados mediante el análisis de Indicadores Locales de Asociación Espacial (LISA). (Vista 4).....	121

Figura 30. Clústeres espaciales de la intensidad de Pudrición de Cogollo identificados mediante el análisis de Indicadores Locales de Asociación Espacial (LISA). (Vista 5)..... 122

Glosario

ASOPALMAR: Asociación de palmeros de San Martín (Cesar)

Caso reportado: Clasificación asignada a una palma enferma según su condición al momento del censo (por ejemplo, caso nuevo, caso reincidente o en seguimiento).

Censo fitosanitario: Proceso sistemático de inspección en campo mediante el cual se registra el estado sanitario de las palmas, incluyendo presencia de enfermedades, severidad y ubicación geográfica.

Cobertura temporal: Grado de continuidad con el que un predio es monitoreado a lo largo del tiempo, medido en número de meses con registros disponibles dentro de un período determinado.

CyberTracker: Herramienta de captura de datos en campo que permite el registro georreferenciado de información sanitaria mediante formularios digitales, facilitando la recolección, almacenamiento y visualización espacial de los datos.

CTX (.ctx): Formato propietario de CyberTracker que permite la visualización espacial de los registros capturados, incluyendo puntos georreferenciados y mapas de predios.

Enfermedad fitosanitaria: Afección que compromete la sanidad de las palmas de aceite, como la Pudrición de Cogollo, y que puede afectar la productividad y sostenibilidad del cultivo.

Geolocalización: Proceso mediante el cual se asignan coordenadas geográficas (latitud y longitud) a cada palma censada, permitiendo su ubicación precisa en el espacio.

Grado de severidad: Escala ordinal utilizada para clasificar el nivel de afectación de una palma enferma, generalmente expresada en valores discretos que reflejan la intensidad del daño.

Monitoreo fitosanitario: Conjunto de actividades periódicas orientadas a la detección, seguimiento y control de enfermedades en los cultivos de palma.

Palma única: Unidad individual de observación correspondiente a una palma de aceite inspeccionada durante el censo fitosanitario.

Palma enferma: Palma de aceite en la cual se identifica la presencia de una enfermedad durante la inspección en campo.

Predio: Unidad productiva o parcela agrícola donde se realiza el cultivo de palma de aceite. En este estudio, los predios están definidos de forma administrativa y no necesariamente por límites geográficos continuos.

Registro georreferenciado: Observación que contiene información sanitaria asociada a una ubicación espacial específica, capturada mediante coordenadas geográficas.

Vecindad espacial: Relación definida entre unidades espaciales (palmas o predios) que permite evaluar interacciones o dependencias espaciales, fundamental para análisis como autocorrelación espacial.

XLSX (.xlsx): Formato de archivo utilizado para la exportación tabular de los datos recolectados en campo, facilitando su análisis estadístico y procesamiento posterior.

Resumen

Título: Análisis espacio-temporal y detección de focos de pudrición de cogollo en ASOPALMAR (Cesar): un enfoque mediante geolocalización con datos parciales*

Autoras: Carolina Duque Solano, Ludy Ovallos Gaona**.

Palabras clave: Pudrición de cogollo (PC), Palma africana, Análisis espacio-temporal , Autocorrelación espacial (Moran/LISA), Hotspots persistentes

Descripción:

Se realizó un diagnóstico espacio-temporal de la Pudrición de Cogollo (PC) en palma de aceite para los predios asociados a la Asociación de Palmeros de San Martín (Cesar), a partir de registros georreferenciados de eventos sanitarios, con el fin de identificar focos de riesgo recurrentes. El objetivo central fue cuantificar la dinámica mensual de la enfermedad y evaluar el agrupamiento espacial, además de detectar hotspots persistentes y predios atípicos para orientar la priorización del monitoreo y el control fitosanitario. La principal limitante correspondió a la cobertura parcial: no todos los predios fueron evaluados en todos los meses y el sistema de captura registró principalmente palmas con afectación, lo que exigió el uso de estimaciones (p. ej., palmas sembradas por hectárea) y un manejo cuidadoso de indicadores. El procedimiento incluyó depuración y estandarización de bases, construcción de polígonos por predio mediante convex hull y capas puntuales, cálculo de métricas (tasa por 1.000 palmas, intensidad por 100 palmas e intensidad basada en eventos) y análisis de autocorrelación espacial mediante el Índice global de Moran y LISA bajo vecindades KNN, comparando resultados en Python y ArcGIS Pro. El marco conceptual se apoyó en la literatura clásica de estadística espacial, especialmente en los aportes de Moran, Geary y Anselin. Se encontró autocorrelación espacial positiva y significativa en la mayoría de los meses, se identificaron hotspots Alto–Alto recurrentes y un grupo de predios con persistencia de foco, y se evidenciaron meses sin patrón global significativo donde predominó la heterogeneidad. En conclusión, la PC mostró agrupamientos temporales y focos persistentes susceptibles de intervención focalizada; además, se demostró que, aun con información parcial, fue posible generar evidencia útil para decisiones operativas, documentando supuestos, variación mensual de cobertura y la diferencia entre incidencia (casos nuevos) y recurrencia (casos anteriores).

* Trabajo de Grado

** Facultad de Ingeniería Físico-mecánicas Escuela de Matemáticas Especialista en Estadística Director: Dagoberto Bermúdez Rubio Magister en Ciencias - Estadística

Abstract

Title: Spatio-temporal analysis and detection of bud rot hotspots in ASOPALMAR (Cesar): a geolocation approach with partial data*

Authors: Carolina Duque Solano, Ludy Ovallos Gaona**.

Keywords: Bud rot (BR), Oil palm, Spatio-temporal analysis, Spatial autocorrelation (Moran/LISA), Persistent hotspots

Description:

Spatio-temporal diagnostic assessment of Bud Rot (BR) in oil palm for the farms associated with the *ASociación e Palmeros de San Martín Cesar ASOPALMAR*, built from georeferenced sanitary event records and aimed at identifying recurrent risk hotspots. The main objective is to quantify the monthly dynamics of the disease and evaluate the presence of spatial clustering, as well as to detect persistent hotspots and atypical farms to support the prioritization of monitoring and phytosanitary control actions. The primary limitation is the partial coverage of information: not all farms are assessed every month, and the data-collection system mainly records affected palms, which requires the use of estimates (e.g., planted palms per hectare) and careful handling of indicators. The procedure included data cleaning and standardization, construction of farm polygons (convex hull) and point layers, calculation of metrics (rate per 1,000 palms, intensity per 100 palms, and event-based intensity), and spatial autocorrelation analysis using the Global Moran's I and LISA under KNN neighborhood structures, comparing outputs from Python and ArcGIS Pro. The conceptual framework draws on the foundational literature in spatial autocorrelation and spatial statistics, particularly the contributions of Moran and Geary, and Anselin's development of local indicators (LISA), along with approaches to point-pattern analysis and spatial epidemiology. Key results include positive and statistically significant spatial autocorrelation in most months, the identification of recurrent High-High hotspots and a group of farms with persistent hotspot behavior, and the occurrence of months without significant global patterns where heterogeneity predominates. Overall, Bud Rot shows temporally varying spatial clustering and persistent hotspots that can be targeted through focused interventions; moreover, the analysis demonstrates that—even with partial information—useful evidence can be produced for operational decision-making, provided that assumptions, month-to-month coverage variability, and the distinction between incidence (new cases) and recurrence (previous cases) are clearly documented.

* Trabajo de Grado

** Facultad de Ingeniería Físico-mecánicas Escuela de Matemáticas Especialista en Estadística Director: Dagoberto Bermúdez Rubio Magister en Ciencias - Estadística

Introducción

La *Elaeis guineensis*, comúnmente conocida como palma africana, es una planta perenne cuya longevidad puede superar los 100 años, con un periodo de productividad económica aproximado de 30 años. Su cultivo se desarrolla principalmente en regiones de clima tropical cálido, propias de la selva húmeda tropical, donde las condiciones ambientales favorecen su crecimiento y rendimiento. En Colombia, la palma de aceite constituye un eje fundamental para la economía agrícola, involucrando a pequeños, medianos y grandes productores, representando una fuente significativa de empleo y desarrollo regional.

Debido a la larga vida útil del cultivo, el manejo sanitario adquiere un papel estratégico en la sostenibilidad productiva de los sistemas palmeros. Entre las principales amenazas fitosanitarias se destacan enfermedades de alto impacto económico, como la Pudrición de Cogollo (PC) enfermedad causada por el microorganismo *Phytophthora palmivora*, el cuál es capaz de degradar los tejidos más internos del cogollo de la palma africana (punto central y punto de crecimiento de la palmera, de donde emergen las hojas nuevas y jóvenes (flechas)) atacándola en cualquier edad de manera agresiva y es de fácil dispersión, una sola palma enferma y sin tratamiento puede afectar palmas vecinas y en poco tiempo toda una plantación.). Estas enfermedades presentan patrones de aparición y propagación complejos, influenciados por factores ambientales, condiciones del suelo, prácticas de manejo y características propias del cultivo.

La detección y posterior tratamiento de la Pudrición de Cogollo constituye uno de los mayores desafíos para los productores, debido a sus efectos sobre la productividad, la estabilidad del cultivo y los costos asociados al manejo fitosanitario. Si bien en grandes plantaciones se han

incorporado herramientas tecnológicas, geoespaciales y estadísticas para el monitoreo sanitario a gran escala, las pequeñas asociaciones de productores enfrentan limitaciones técnicas, operativas y económicas que restringen el acceso a estas tecnologías, basando gran parte del control sanitario en censos manuales y observaciones en campo.

En este contexto, resulta fundamental el desarrollo y aplicación de metodologías estadísticas y espaciales que, a partir de información censal georreferenciada, permitan identificar patrones espaciales y temporales de la enfermedad, detectar focos recurrentes y apoyar la toma de decisiones en el manejo fitosanitario del cultivo. El uso de herramientas accesibles de análisis espacial y estadístico se presenta como una alternativa viable para fortalecer el monitoreo sanitario, optimizar los recursos disponibles y contribuir a la sostenibilidad productiva de los sistemas palmeros, particularmente en el ámbito de las asociaciones de pequeños y medianos productores.

Su dinámica depende de múltiples factores —ambientales, operativos y de manejo agronómico— que pueden variar en el espacio y en el tiempo, generando patrones de concentración de casos en determinados predios o periodos. En este contexto, la incorporación de información georreferenciada proveniente de censos y monitoreos de campo permite pasar de una descripción general del problema a un análisis que identifique zonas de mayor riesgo y focos con comportamiento persistente. En la Asociación de Palmeros de San Martín (Cesar) – ASOPALMAR, el monitoreo de afectaciones se realiza mediante registros geolocalizados (CyberTracker), los cuales capturan eventos asociados a palmas con alguna novedad sanitaria. Sin embargo, la información disponible presenta cobertura parcial: no todos los predios son evaluados cada mes y el sistema prioriza el registro de palmas afectadas, lo que limita la comparación directa con el total de palmas sanas. Aun así, mediante la integración de variables productivas (hectareaje) y supuestos técnicos (densidad de siembra), es posible construir indicadores comparables entre

predios y periodos, y evaluar tendencias temporales y espaciales de la enfermedad. Este trabajo propone un análisis espacio-temporal de la PC durante 2025 a nivel de predio, combinando la estimación de métricas de afectación (tasa por 1.000 palmas sembradas, proporción de palmas afectadas e intensidad de eventos) con herramientas de estadística espacial como el Índice global de Moran y los indicadores locales LISA. El enfoque permite identificar si existe agrupamiento espacial significativo, ubicar hotspots (focos Alto–Alto), reconocer predios atípicos (outliers) y determinar focos persistentes a lo largo de los meses. Los resultados buscan aportar evidencia útil para orientar el monitoreo y priorizar intervenciones fitosanitarias en un escenario real de información incompleta y predios espacialmente dispersos.

Este estudio adopta un enfoque de estadística espacial aplicada, orientado no solo a la comprensión académica de la Pudrición de Cogollo, sino también a la construcción de una herramienta operativa que apoye la gestión del riesgo sanitario en los predios asociados a ASOPALMAR.

1. Planteamiento del problema

1.1 Contexto y justificación

La palma africana (*Elaeis guineensis*) constituye la oleaginosa de mayor productividad a nivel mundial, en tanto que una hectárea cultivada puede generar entre seis y diez veces más aceite que otros cultivos de su mismo género (Corley & Tinker, 2015). En este contexto, Colombia se

ubica como el cuarto productor mundial de aceite de palma y el primero en el continente americano. Este sector aporta aproximadamente el 10,5 % al Producto Interno Bruto (PIB) agrícola nacional, ocupa el quinto lugar dentro de las exportaciones agropecuarias y concentra cerca del 96% de la producción nacional de aceites y grasas (Federación Nacional de Cultivadores de Palma de Aceite - Fedepalma, 2025).

Para el desarrollo del presente estudio se emplean las estadísticas del Censo Nacional de Palma de Aceite de Colombia, realizado en 2011, el cual constituye la referencia oficial más reciente y reporta un área sembrada de 391.187 hectáreas (Federación Nacional de Cultivadores de Palma de Aceite - Fedepalma, 2011). De manera complementaria, y a partir de los ajustes derivados del análisis de imágenes satelitales y de las cifras actualizadas de siembra de palma de aceite correspondientes al año 2024, se estima que el área cultivada en el país asciende a 609.142 hectáreas (Federación Nacional de Cultivadores de Palma de Aceite - Fedepalma, 2025). Estas estimaciones se sustentan en información de la Federación Nacional de Cultivadores de Palma de Aceite (Fedepalma), entidad que estructura la palmicultura colombiana en cuatro zonas productivas principales —Norte, Oriental, Central y Suroccidental—, las cuales abarcan un total de 169 municipios distribuidos en 21 departamentos. La Tabla 1 presenta la distribución geográfica del área sembrada, en producción y en desarrollo por zona para el año 2024.

Tabla 1.

Distribución geográfica por zonas principales (Norte, Oriental, Central y Suroccidental) de los cultivos de palma africana en Colombia (2024)

Área	Oriental		Norte		Central		Suroccidental	
	Ha	(Part.(%))	Ha	(Part.(%))	Ha	(Part.(%))	Ha	(Part.(%))
Sembrada	273.376	44,9	106.772	17,5	206.656	33,9	22.338	3,7
En producción	228.593	44,7	91.103	17,8	173.071	33,8	18.816	3,7

Área	Oriental		Norte		Central		Suroccidental	
	Ha	(Part.(%))	Ha	(Part.(%))	Ha	(Part.(%))	Ha	(Part.(%))
En desarrollo	44.783	45,9	15.669	16,1	33.585	34,4	3.522	3,6

Nota. Anuario Estadístico / Statistical Yearbook 2025 (Fedepalma)

No obstante, la sostenibilidad y productividad del cultivo se ven amenazadas por la presencia de enfermedades fitosanitarias, entre las cuales destaca la Pudrición de Cogollo (PC), asociada a organismos del grupo de los Oomycetes. Esta enfermedad representa uno de los principales riesgos sanitarios para la palmicultura colombiana debido a su alta capacidad de propagación y severo impacto productivo (Corporación Centro de Investigación en Palma de Aceite - Cenipalma, 2019). En este contexto, la Asociación de Palmicultores de San Martín, Cesar en adelante ASOPALMAR, enfrenta desafíos significativos relacionados con la detección temprana y el control efectivo de esta patología en sus plantaciones.

La agresividad y la rapidez con las que la PC afecta a las palmas se ven favorecidas por condiciones ambientales húmedas, presencia de encharcamientos, deficiencias en la fertilización y, principalmente, por la ausencia de controles periódicos. Estos factores incrementan significativamente su impacto sobre la productividad y elevan los costos asociados a su manejo y control fitosanitario (Corporación Centro de Investigación en Palma de Aceite - Cenipalma, 2019).

En el marco de los censos de campo, desde el año 2021 ASOPALMAR dispone de registros geolocalizados (latitud y longitud) a nivel de palma individual, lo que permite cuantificar la intensidad de la PC por predio y analizar su comportamiento espacial y temporal. La información se recopila mediante un sistema de monitoreo apoyado en CyberTracker, un software especializado para la captura de datos geográficos desarrollado por CyberTracker Conservation (Sudáfrica). Su implementación ha permitido consolidar un volumen significativo de registros de campo con alto nivel de detalle, incluyendo diagnóstico de enfermedades, grados de severidad, clasificación del

caso (nuevo o recurrente), coordenadas GPS e identificadores de predio, lote y palma. (Valbuena, 2021).

En conjunto, estos atributos fortalecen la trazabilidad del censo y soportan el análisis cuantitativo de la Pudrición de Cogollo a escala predial, así como la evaluación de patrones espacio-temporales. Sin embargo, a pesar de la riqueza y granularidad de los datos disponibles, la asociación no cuenta actualmente con un sistema estadístico y geoespacial robusto que permita transformar dichos registros en conocimiento estratégico. En particular, no se dispone de herramientas analíticas que identifiquen focos de contagio, patrones espacio-temporales persistentes ni modelos predictivos que adviertan oportunamente el riesgo de propagación de la enfermedad.

Adicionalmente, no todos los predios pertenecientes a ASOPALMAR que han sido objeto de monitoreo se encuentran espacialmente contiguos. La información geográfica disponible corresponde únicamente a un subconjunto de predios (aproximadamente 76 polígonos), lo que da lugar a una distribución espacial discontinua. Algunos predios son contiguos entre sí, mientras que otros están separados por barreras físicas como carreteras o áreas de arborización, e incluso por distancias equivalentes a varios predios intermedios sin información. Esta configuración limita el uso directo de esquemas de vecindad basados en contigüidad (criterios *Queen* o *Rook*) y hace necesario el empleo de métodos alternativos basados en proximidad, como los *k vecinos más cercanos*, para la evaluación de la autocorrelación espacial.

A partir del análisis exploratorio de los datos recolectados, se identificó que la autocorrelación espacial global no es constante en el tiempo; por ejemplo, en el mes de octubre el estadístico de Moran global no resultó significativo. En contraste, el análisis de autocorrelación espacial local (LISA) permitió identificar focos espaciales recurrentes (*hotspots*) concentrados en

un grupo reducido de predios. Este comportamiento sugiere un patrón espacial heterogéneo y focalizado, el cual resulta más adecuado para la priorización operativa y la toma de decisiones a nivel predial que para la formulación de generalizaciones basadas únicamente en agrupamientos globales.

1.2 Problema central

Falta de un sistema integrado de análisis epidemiológico que permita identificar patrones espacio-temporales de propagación de enfermedades, optimizar recursos de intervención y reducir pérdidas económicas en los cultivos de palma africana.

1.3 Preguntas de investigación

- ¿Existen patrones espaciales significativos en la distribución de enfermedades en los cultivos?
- ¿Existen patrones espacio-temporales y focos persistentes de Pudrición de Cogollo entre los predios con información disponible, y cómo se comportan estos focos a lo largo del tiempo bajo una vecindad definida por proximidad espacial?
- ¿Se presentan patrones de agrupamiento espacial de la enfermedad entre predios, o su distribución es compatible con un comportamiento aleatorio?
- ¿De qué manera la información geolocalizada proveniente de los censos de campo puede apoyar la toma de decisiones para el monitoreo y el control fitosanitario de la PC?
- ¿Cómo evolucionan temporalmente los grados de severidad de las enfermedades?

- ¿Existen patrones espaciales significativos en la distribución de enfermedades?
- ¿Cuáles predios presentan mayor riesgo epidemiológico y por qué?

2. Objetivos

2.1 Objetivo general

Caracterizar la dinámica espacio-temporal de la Pudrición de Cogollo a nivel de predio mediante autocorrelación espacial global y local (Moran y LISA) usando vecindades por proximidad, e identificar focos persistentes para priorización de intervención.

2.2 Objetivos específicos

- Caracterizar la dinámica temporal mensual de la Pudrición de Cogollo durante el año 2025.
- Describir la distribución espacial de la enfermedad a nivel de predio mediante indicadores exploratorios.
- Identificar patrones de autocorrelación espacial y posibles focos de concentración de la enfermedad utilizando estadísticos espaciales globales y locales.
- Evaluar el potencial del enfoque metodológico propuesto como herramienta de apoyo para la gestión del riesgo sanitario, considerando escenarios de información parcial.

3. Marco de referencia

3.1 Marco teórico

El estudio se fundamenta en un marco teórico interdisciplinario que integra conceptos de epidemiología vegetal, estadística espacial, control estadístico de procesos y análisis de supervivencia. Este enfoque permite interpretar la dinámica espacio-temporal de la Pudrición de Cogollo (PC) en palma de aceite a partir de registros geolocalizados de censo, con el fin de apoyar la toma de decisiones en el monitoreo y la gestión fitosanitaria a nivel predial.

3.1.1 Epidemiología vegetal aplicada a la Pudrición de Cogollo

La epidemiología vegetal se ocupa del estudio de la ocurrencia, distribución y determinantes de las enfermedades en poblaciones de plantas, con énfasis en su variación espacial y temporal. Desde esta perspectiva, la Pudrición de Cogollo puede ser caracterizada mediante indicadores epidemiológicos que distinguen entre incidencia, severidad y afectación o prevalencia dentro de la población monitoreada (Campbell & Madden, 1990).

En sistemas de censo periódico, como los utilizados en el monitoreo fitosanitario de cultivos de palma, resulta fundamental diferenciar entre casos nuevos y casos anteriores o en seguimiento. Los primeros están asociados a procesos de expansión espacial y temporal de la enfermedad, mientras que los segundos reflejan persistencia, progresión o recuperación del estado sanitario de las palmas afectadas. Esta distinción es clave para evitar interpretaciones erróneas

sobre la dinámica real de la enfermedad, especialmente cuando la intensidad del monitoreo varía en el tiempo (Jeger, 1986)

3.1.2 Métricas epidemiológicas para datos de censo geolocalizado

Cuando la información epidemiológica proviene de observaciones repetidas a nivel de palma individual, el análisis estadístico debe ser consistente con la unidad de observación y la unidad de agregación. En este contexto, la unidad básica corresponde a la palma individual, mientras que la agregación analítica se realiza a nivel de predio y período temporal (por ejemplo, mes). Para tal fin, se emplean métricas epidemiológicas agregadas que permiten capturar diferentes dimensiones del fenómeno, tales como: tasas normalizadas por número de palmas observadas, proporción de palmas afectadas dentro del censo mensual e indicadores de intensidad basados en eventos registrados. Esta diferenciación es fundamental para evitar interpretar como un incremento en la afectación lo que, en realidad, puede corresponder a un aumento en la frecuencia de visitas o en el seguimiento de palmas previamente diagnosticadas (Madden, Hughes, & van den Bosch, 2007).

Desde un punto de vista operativo, se define un evento como un registro único en la base de datos correspondiente a una observación realizada en una fecha específica. Una palma única corresponde a un individuo identificado de manera independiente (`palm_id`), el cual puede generar múltiples eventos a lo largo del tiempo como resultado de revisitas o seguimientos. Esta estructura de datos longitudinales condiciona la selección de métricas y métodos analíticos apropiados.

3.1.3 Control estadístico de procesos en el monitoreo fitosanitario

El Control Estadístico de Procesos (CEP) proporciona un conjunto de herramientas orientadas a la vigilancia de la estabilidad de un proceso a lo largo del tiempo, permitiendo distinguir entre variabilidad natural y cambios estructurales no esperados (Montgomery, 2019). En el ámbito del monitoreo fitosanitario, el CEP puede aplicarse para identificar períodos con incrementos inusuales en la intensidad o severidad de una enfermedad, así como para apoyar la priorización de acciones de control.

Dependiendo de la naturaleza de la métrica analizada —conteos, proporciones o tasas— pueden emplearse distintos tipos de cartas de control, como gráficos de individuos y rango móvil (I-MR) o cartas para conteos y tasas (c-chart, u-chart). Estas herramientas permiten contextualizar la variación temporal observada dentro de límites estadísticamente esperados y facilitan la detección temprana de comportamientos atípicos que ameriten intervención (Wheeler & Chambers, 2010).

3.1.4 Análisis espacial y autocorrelación

La estadística espacial se ocupa del análisis de fenómenos en los cuales la localización geográfica influye en el comportamiento de las variables observadas. En epidemiología vegetal, este enfoque permite evaluar si las unidades espaciales con alta o baja intensidad de enfermedad tienden a agruparse, o si su distribución es compatible con un patrón aleatorio (Cressie, 1993).

El Índice de Moran es una de las medidas clásicas de autocorrelación espacial global y fue propuesto originalmente por Patrick A. P. Moran en 1950 como una extensión del coeficiente de

correlación de Pearson al análisis de datos geográficamente referenciados. Su objetivo es cuantificar el grado en que los valores de una variable observada en unidades espaciales cercanas tienden a ser más similares (o más disímiles) que lo esperado bajo un patrón de aleatoriedad espacial (Moran, 1950).

Formalmente, el índice evalúa la relación entre las desviaciones de cada observación respecto a la media global y las desviaciones de sus unidades vecinas, ponderadas por una matriz de pesos espaciales que representa la estructura de vecindad. En términos generales, valores positivos del índice indican autocorrelación espacial positiva, es decir, una tendencia al agrupamiento de valores similares (altos con altos o bajos con bajos), mientras que valores negativos reflejan autocorrelación espacial negativa, asociada a patrones de dispersión o alternancia espacial. Valores cercanos a cero sugieren ausencia de autocorrelación espacial y compatibilidad con un patrón aleatorio.

Una característica importante del Índice de Moran es que su dominio está acotado, tomando valores dentro de un intervalo aproximado entre -1 y 1. En consecuencia, el estadístico no puede asumir valores arbitrariamente grandes o pequeños, como por ejemplo -25 o 10. Los valores positivos indican similitud espacial entre unidades cercanas, mientras que los valores negativos reflejan disimilitud espacial entre unidades vecinas.

Desde el punto de vista estadístico, el Índice de Moran se define como:

$$I = \frac{N \sum_i \sum_j w_{ij} (x_i - \bar{x})(x_j - \bar{x})}{\sum_i \sum_j w_{ij} \sum_i (x_i - \bar{x})^2}$$

donde N es el número de unidades espaciales, x_i representa el valor de la variable en la unidad i , \bar{x} es la media global, y w_{ij} corresponde al peso espacial que define la relación de vecindad entre las unidades i y j (Moran, 1950).

Una propiedad fundamental del Índice de Moran es que su valor esperado bajo la hipótesis nula de aleatoriedad espacial no es cero, sino $E(I) = -1/(N - 1)$, lo cual debe ser tenido en cuenta al evaluar su significancia estadística. En aplicaciones prácticas, la significancia del estadístico se evalúa comúnmente mediante pruebas de permutación, las cuales permiten contrastar el valor observado frente a una distribución empírica generada bajo reordenamientos aleatorios de la variable en el espacio (Moran, 1950).

En estudios epidemiológicos, el Índice de Moran ha sido ampliamente utilizado para evaluar la existencia de patrones espaciales globales en la distribución de enfermedades, permitiendo establecer si la intensidad observada responde a procesos espaciales subyacentes o si es compatible con una distribución aleatoria. No obstante, su naturaleza global implica que puede ocultar patrones locales heterogéneos, razón por la cual suele complementarse con indicadores locales de asociación espacial (LISA) para una interpretación más detallada del fenómeno, pues permiten identificar patrones locales específicos, tales como focos de alta intensidad (hotspots), zonas de baja ocurrencia (coldspots) y unidades atípicas que difieren de su vecindario inmediato (Anselin, 1995).

En contextos donde los predios monitoreados presentan una distribución espacial discontinua, las vecindades definidas por contigüidad (criterios Queen o Rook) pueden resultar inadecuadas. En estos casos, las vecindades basadas en k vecinos más cercanos (KNN) constituyen una alternativa metodológica robusta, ya que garantizan un número fijo de vecinos para cada

unidad espacial y facilitan la comparabilidad de los resultados a lo largo del tiempo, incluso cuando la cobertura espacial varía entre períodos de análisis (Anselin, 2002).

3.1.5 Modelos de supervivencia aplicados a datos agrícolas

Los modelos de supervivencia se utilizan para analizar el tiempo transcurrido hasta la ocurrencia de un evento de interés, como la primera detección de una enfermedad, o la duración de un estado específico, como el período desde la detección hasta la recuperación o eliminación de una palma afectada. Estos modelos son especialmente pertinentes cuando se dispone de datos longitudinales con trazabilidad individual y fechas consistentes de inicio y desenlace (Cox, 1972).

En el ámbito agrícola, el análisis de supervivencia permite estimar funciones de riesgo (*hazard*) y comparar tiempos entre diferentes grupos, por ejemplo, entre predios, niveles de severidad o condiciones de manejo. Cuando las bases de datos incluyen identificadores únicos por palma y registros temporales confiables, este enfoque complementa el análisis espacio-temporal al aportar una perspectiva centrada en la duración y progresión del estado sanitario (Kleinbaum & Moeschberger, 2003).

3.2 Marco conceptual

En esta investigación se emplea un conjunto de conceptos operativos que permiten interpretar la información sanitaria georreferenciada y estructurar el análisis a escala de palma, predio y mes. Estas definiciones garantizan la consistencia entre las variables registradas en

campo, los indicadores epidemiológicos derivados y los métodos de estadística espacial utilizados para el análisis de la Pudrición de Cogollo.

Las definiciones conceptuales empleadas en adelante se basan en literatura de epidemiología vegetal y estadística espacial, adaptadas operativamente al contexto de censos geolocalizados en cultivos palma de aceite (Campbell & Madden, 1990; Madden et al., 2007; Anselin, 1995; Moran, 1950).

Pudrición de Cogollo (PC). Enfermedad fitosanitaria que compromete el tejido del cogollo o meristemo apical de la palma de aceite, afectando el crecimiento, la productividad y, en estadios avanzados, la viabilidad de la planta. En este estudio, la PC se analiza a partir de eventos geolocalizados registrados en censos de campo y su posterior agregación a nivel predial y temporal.

Evento (registro). Unidad mínima de información capturada en campo, asociada a una fecha específica, una localización geográfica (coordenadas GPS) y atributos sanitarios de la palma observada. El evento representa una observación puntual; por tanto, múltiples eventos pueden corresponder a una misma palma en diferentes momentos del tiempo, lo que exige distinguir entre conteos de eventos y conteos de individuos únicos.

Palma única. Identificador de un individuo de palma (por ejemplo, palm_id) que permite reconocerla de manera inequívoca y evitar la duplicación de registros producto de visitas. Este concepto es fundamental para estimar la afectación real (proporción de palmas afectadas) y para realizar análisis longitudinales de la evolución sanitaria.

Predio. Unidad espacial de gestión y agregación del análisis. En esta investigación, el predio —identificado mediante un código único— constituye la unidad básica para el cálculo de indicadores epidemiológicos mensuales y para la evaluación de la autocorrelación espacial.

Severidad. Magnitud del daño o grado de avance del proceso patológico en una palma afectada, generalmente expresada en categorías ordinales. La severidad complementa la incidencia al caracterizar el nivel de afectación de la enfermedad, más allá del número de palmas que la presentan.

Estado fitosanitario. Condición operativa de la palma frente a la enfermedad, que refleja su evolución clínica y las decisiones de manejo adoptadas (por ejemplo, en recuperación, pendiente de tratamiento, eliminada o dada de alta). Este concepto es relevante para estudios longitudinales y para interpretar la persistencia de eventos en el tiempo.

Incidencia. Aparición de nuevos casos de la enfermedad durante un período determinado, asociada a la detección inicial de la PC en una palma previamente no afectada. Operativamente, la incidencia puede aproximarse mediante la categoría de “caso nuevo” registrada en el censo.

Recurrencia o seguimiento. Registro repetido de un caso previamente detectado, relacionado con la persistencia de la enfermedad o con procesos de control y monitoreo. Se aproxima mediante la categoría de “caso anterior” y resulta particularmente útil para interpretar incrementos en el número de eventos que no se corresponden con aumentos equivalentes en palmas únicas afectadas.

Riesgo fitosanitario. Probabilidad o propensión relativa de que la enfermedad ocurra o se mantenga en una unidad espacial o temporal. En este estudio, el riesgo se infiere indirectamente a partir de indicadores agregados (tasas e intensidades) y de la evidencia de agrupamiento espacial significativo.

Clúster (agrupamiento). Patrón espacial en el cual unidades geográficas cercanas presentan valores similares de una variable de interés. La identificación de clústeres es relevante porque

sugiere la presencia de factores compartidos, ya sean ambientales, productivos o de manejo, o procesos de propagación espacial de la enfermedad.

Hotspot. Zona o conjunto de unidades espaciales con valores altos de la variable analizada, estadísticamente concentrados. En el marco de los indicadores locales de asociación espacial (LISA), un hotspot corresponde a la categoría Alto–Alto y se asocia a focos prioritarios para la intervención fitosanitaria.

Outlier espacial. Unidad espacial cuyo valor contrasta con el de su vecindario inmediato, presentándose como Alto–Bajo o Bajo–Alto. Este tipo de patrón indica heterogeneidad local, posibles diferencias en manejo o condiciones particulares, y orienta acciones de verificación o ajuste en campo.

Autocorrelación espacial. Relación estadística entre los valores de una variable y la proximidad geográfica de las unidades que los contienen. La autocorrelación es positiva cuando unidades cercanas presentan valores similares y negativa cuando presentan valores contrastantes. Su evaluación sustenta la hipótesis de existencia de patrones espaciales no aleatorios.

Índice global de Moran. Medida de autocorrelación espacial global que resume el grado de agrupamiento de una variable en toda el área de estudio. Su interpretación requiere considerar la significancia estadística, usualmente evaluada mediante pruebas de permutación.

LISA (Indicadores Locales de Asociación Espacial). Conjunto de estadísticos que permiten identificar y clasificar la contribución de cada unidad espacial al patrón global de autocorrelación. En este estudio se emplean para reconocer hotspots, coldspots y unidades atípicas a nivel predial.

Matriz de pesos espaciales (W). Estructura matemática que formaliza la relación de vecindad entre unidades espaciales. En contextos de predios dispersos, se recomienda una

definición basada en proximidad —como los k vecinos más cercanos— para asegurar conectividad y comparabilidad de los análisis.

K vecinos más cercanos (KNN). Del inglés K-Nearest Neighbors. Criterio de vecindad en el cual cada unidad espacial se asocia a un número fijo de vecinos geográficamente más próximos. Este enfoque es adecuado cuando no existe contigüidad clara entre predios o cuando hay unidades aisladas.

Interpolación espacial. Conjunto de métodos utilizados para estimar valores en ubicaciones no muestreadas a partir de observaciones cercanas. En el contexto de datos con cobertura parcial, su uso es principalmente exploratorio o con fines de visualización, y sus resultados deben interpretarse con cautela.

Convex hull. Polígono convexo mínimo que contiene el conjunto de puntos asociados a un predio. Se emplea como una aproximación del límite espacial cuando no se dispone de cartografía oficial de los predios.

Cobertura parcial. Condición en la cual la información disponible no cubre completamente el universo espacial o temporal de interés (por ejemplo, no todos los predios o meses cuentan con datos). Esta situación impone limitaciones para comparaciones directas y exige reportar explícitamente el tamaño muestral por período, así como los supuestos utilizados para la definición del denominador (palmas observadas versus palmas sembradas estimadas).

3.3 Estado del arte

La incorporación de métodos de análisis espacial y espacio-temporal en la investigación agrícola ha marcado una transición desde enfoques predominantemente descriptivos hacia

metodologías cuantitativas orientadas a la identificación de patrones de riesgo, la comprensión de procesos de propagación y la optimización de decisiones de manejo. En epidemiología vegetal, se reconoce ampliamente que la distribución de enfermedades rara vez es homogénea, ya que responde a la interacción de factores ambientales, edáficos, biológicos y de manejo que varían en el espacio y el tiempo (Madden, Hughes, & van den Bosch, 2007).

Diversos estudios han documentado que la heterogeneidad espacial observada en cultivos agrícolas está asociada a gradientes microclimáticos, variabilidad en las propiedades del suelo, diferencias en el material vegetal y prácticas agronómicas diferenciadas, lo que convierte a la georreferenciación de observaciones sanitarias en un insumo esencial para la vigilancia fitosanitaria y la intervención focalizada (Garrett, 2011). En este contexto, la disponibilidad de datos geolocalizados a nivel de planta o unidad mínima de observación ha permitido avanzar hacia análisis más finos de la dinámica epidemiológica, superando los enfoques agregados tradicionales.

En el ámbito de la modelación espacial aplicada a sistemas agrícolas, el uso de medidas de autocorrelación espacial se ha consolidado como una estrategia central para evaluar la existencia de patrones no aleatorios en la distribución de enfermedades. El Índice global de Moran es ampliamente utilizado para detectar autocorrelación espacial a escala global, mientras que los indicadores locales de asociación espacial (LISA) permiten identificar agrupamientos locales, focos de alta intensidad (*hotspots*), zonas de baja ocurrencia (*coldspots*) y unidades atípicas (*outliers*) (Cliff & Ord, 1981) Estos métodos han sido aplicados extensamente en estudios epidemiológicos para apoyar la toma de decisiones basada en evidencia espacial.

En el marco de la agricultura de precisión, los análisis de autocorrelación espacial suelen complementarse con herramientas de Sistemas de Información Geográfica (SIG) y, en algunos casos, con métodos de interpolación espacial como el inverso de la distancia ponderada (IDW) o

el kriging. Estas técnicas permiten visualizar gradientes espaciales y construir superficies continuas de riesgo o intensidad; sin embargo, la literatura enfatiza que su validez depende críticamente de la densidad del muestreo, la distribución espacial de los puntos y el cumplimiento de supuestos estadísticos, por lo que su uso debe interpretarse con cautela en contextos de cobertura parcial o muestreo irregular (Isaaks & Srivastava, 1989).

De manera creciente, los estudios incorporan explícitamente la dimensión temporal mediante análisis mensuales, estacionales o multianuales, lo que permite evaluar la persistencia de focos, la estacionalidad de la enfermedad y la estabilidad de los patrones espaciales a lo largo del tiempo. Este enfoque espacio-temporal resulta especialmente relevante en enfermedades de desarrollo progresivo, donde la diferenciación entre aparición de nuevos casos e intensificación del seguimiento es clave para una correcta interpretación epidemiológica (Garrett, 2011)

En cuanto a las herramientas analíticas, plataformas como ArcGIS Pro y QGIS se han consolidado como entornos ampliamente utilizados para el procesamiento, la visualización y el análisis exploratorio de datos espaciales en agricultura. Paralelamente, el uso de lenguajes reproducibles como Python ha fortalecido la automatización, la trazabilidad y la replicabilidad de los análisis mediante librerías especializadas como GeoPandas para el manejo de información geoespacial y PySAL/ESDA para el cálculo de estadísticos de autocorrelación global y local (Anselin, Rey, & Li, PySAL: A Python library for spatial data science., 2020). Esta convergencia metodológica resulta particularmente relevante en escenarios caracterizados por grandes volúmenes de datos, monitoreos continuos y necesidad de auditoría analítica.

En sistemas productivos de palma de aceite, el estado del arte resalta la importancia de integrar datos longitudinales a nivel de planta o unidad mínima de observación con agregaciones operativas a nivel de predio. Este enfoque permite diferenciar incrementos asociados a la

incidencia real de la enfermedad frente a aumentos derivados de procesos de seguimiento y control, evitando interpretaciones sesgadas de la dinámica sanitaria. Asimismo, cuando los predios monitoreados presentan una distribución espacial discontinua o existen vacíos de información, la literatura recomienda el uso de criterios de vecindad robustos, como los k vecinos más cercanos (KNN), así como el reporte explícito de la cobertura espacial y temporal por período de análisis (Anselin L. , 2002).

En este marco, la identificación de hotspots persistentes y unidades atípicas se consolida como una estrategia ampliamente aceptada para la priorización de recursos de monitoreo y control fitosanitario, especialmente en contextos de información incompleta o restricciones operativas. La combinación de análisis espacial global, indicadores locales y evaluación temporal permite orientar intervenciones focalizadas, mejorar la eficiencia del control sanitario y fortalecer los sistemas de vigilancia epidemiológica en cultivos de importancia económica como la palma de aceite.

4. Marco metodológico

4.1 Diseño de investigación

La investigación se desarrolla bajo un enfoque mixto, con predominio cuantitativo, que integra análisis estadístico y espacial de datos georreferenciados, complementado con una interpretación cualitativa de los resultados en términos de gestión fitosanitaria.

El estudio es de tipo longitudinal, descriptivo–analítico, dado que analiza la evolución de la Pudrición de Cogollo (PC) a lo largo del tiempo mediante observaciones repetidas, y busca identificar patrones, tendencias y relaciones espaciales.

El alcance del análisis es correlacional espacio-temporal, orientado a evaluar la existencia de autocorrelación espacial global y local, así como la persistencia temporal de focos de la enfermedad entre predios.

Dado que no todos los predios cuentan con información en todos los períodos analizados, el cálculo de los índices de autocorrelación espacial se realizó considerando únicamente las unidades espaciales con registros disponibles en cada mes, lo cual puede influir en la magnitud del estadístico. Esta condición se asume como una característica inherente al análisis exploratorio con datos parciales.

4.2 Población y muestra

La población de estudio está constituida por 212.630 registros de observaciones de palmas monitoreadas, correspondientes a la base de datos de censos fitosanitarios de la Asociación de Palmicultores de San Martín, Cesar (ASOPALMAR).

La cobertura espacial comprende cuatro zonas administrativas de la asociación: Holanda, Campo Alegre, Candelia y La Curva, en un área aproximada de 784 hectáreas ubicado entre las coordenadas delimitada entre las latitudes $7^{\circ} 38' 24.06''$ N y $8^{\circ} 03' 18.44''$ N, y las longitudes $73^{\circ} 39' 55.69''$ O y $73^{\circ} 24' 03.82''$ O, en plantaciones divididas en 73 predios con edades de siembra entre el año 2002 y 2019 y una densidad de siembra aproximada de 167 palmas por hectárea, las cuales agrupan los predios con información georreferenciada disponible.

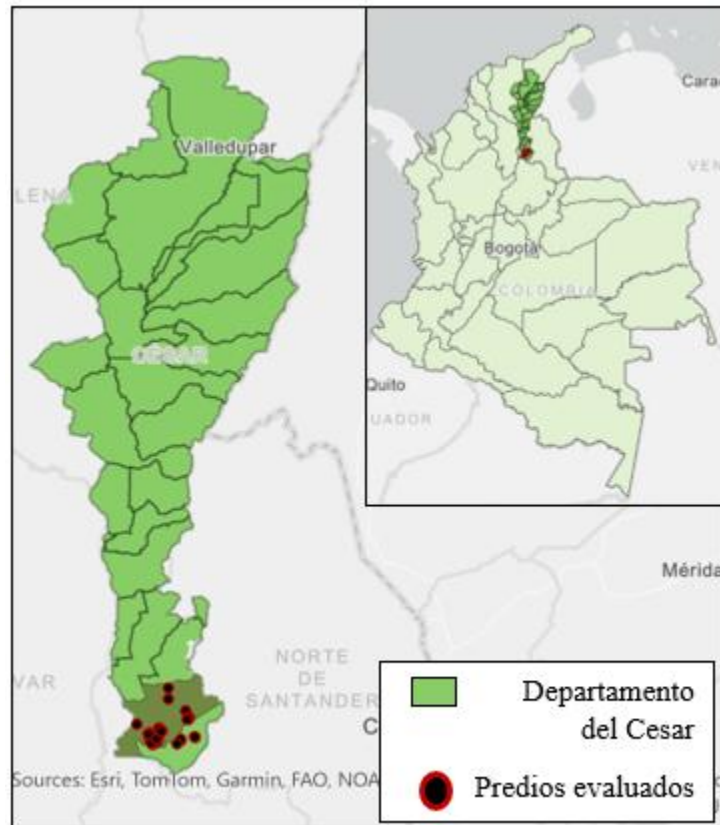
El período de análisis corresponde al año 2025, utilizando información histórica segmentada a nivel mensual, lo que permite evaluar la dinámica temporal de la enfermedad y su comportamiento espacial a lo largo del año. Cabe aclarar que los censos fitosanitarios se realizan de manera periódica con frecuencia mensual en los predios asociados; sin embargo, para algunos meses y predios la información no fue entregada de forma completa al momento del análisis.

En consecuencia, el estudio se fundamenta en una muestra no probabilística, definida por la disponibilidad efectiva de registros por predio y período, situación que se considera una condición operativa del sistema de información y que no afecta la validez del análisis descriptivo y exploratorio desarrollado.

El área de estudio corresponde a predios dedicados al cultivo de palma de aceite localizados en el departamento del Cesar, Colombia, los cuales forman parte del sistema de monitoreo fitosanitario de la asociación ASOPALMAR. La Figura 1 presenta la localización geográfica de los predios incluidos en el análisis, permitiendo contextualizar espacialmente la distribución de las unidades evaluadas dentro del área de estudio.

Figura 1.

Localización del área de estudio y predios monitoreados



4.3 Variables de estudio

Se mantiene la estructura original de la base de datos; sin embargo, para efectos del análisis espacio-temporal se priorizan las variables estrictamente necesarias para la construcción de indicadores epidemiológicos y estadísticos.

VARIABLES CLAVE

- Código: identificador único del predio.
- Latitud, longitud: coordenadas geográficas de la observación.
- Palm_id: identificador único de la palma observada.

- Mes: etiqueta temporal correspondiente al mes de la visita.
- PC: indicador de presencia de Pudrición de Cogollo a nivel de evento.

4.3.1 Variables a nivel evento / palma (datos CyberTracker)

Tabla 2.

Variables exportadas por Cybertracker

Variable	Tipo	Uso
Fecha	Cuantitativa (temporal)	Asignación de periodo (mes) y análisis longitudinal
Mes (mes / mes_nombre)	Categoría ordinal (enero–diciembre)	Agregación mensual y comparación temporal
Código de predio (codigo)	Categoría nominal	Identificación de la unidad espacial
Identificación de palma (palm_id)	Categoría nominal	Conteo de palmas únicas y seguimiento longitudinal
Coordenadas (latitud, longitud)	Cuantitativas continuas	Georreferenciación y análisis espacial
PC	Binaria (0/1)	Variable de interés principal
Grado de severidad (grado_severidad_num)	Ordinal (1–5)	Caracterización del nivel de daño
Caso	Categoría dicotómica (NUEVO / ANTERIOR)	Diferenciar incidencia de seguimiento

4.3.2 Variables agregadas a nivel predio–mes

Palmas observadas

Corresponde al número total de palmas que fueron inspeccionadas durante las actividades de monitoreo fitosanitario en un predio específico durante un mes determinado. Cada palma

evaluada es registrada individualmente mediante un identificador único (*palm_id*), lo que permite contabilizar el total de palmas revisadas en el período de análisis.

Palmas observadas = Número total de palmas evaluadas en el predio durante el mes

Tipo: cuantitativa discreta

Cálculo:

$$\text{Palmas observadas} = \text{numero de } Palm_{id} \text{ únicos en el predio y mes}$$

Eventos PC

Tipo: cuantitativa discreta

Cálculo:

$$\text{eventos_pc} = \sum pc$$

Palmas PC únicas

Corresponde al número de palmas distintas que presentaron síntomas de Pudrición de Cogollo (PC) durante el período de observación. Se consideran únicamente palmas únicas identificadas mediante su identificador individual (*palm_id*), evitando contar múltiples registros de la misma palma en caso de que haya sido evaluada más de una vez, donde $PC = 1$ indica que la palma presenta síntomas de Pudrición de Cogollo.

Tipo: cuantitativa discreta

Cálculo:

$$palmas_{pc_{unicas}} = \text{número de } palm_{id} \text{ únicos con } pc = 1$$

Palmas sembradas estimadas

Tipo: cuantitativa continua (estimada)

Cálculo:

$$\text{palmas_sembradas_est} = \text{hectareaje} \times 167$$

donde 167 palmas/ha corresponde a densidad técnica reportada.

4.3.3 Indicadores principales (variables respuesta)

Tasa de PC por 1.000 palmas sembradas

$$Tasa_{1000} = (P_{pc} / P_{sem}) \times 1000$$

Intensidad de PC por 100 palmas observadas

$$Intensidad_{100} = (P_{pc} / P_{obs}) \times 100$$

Intensidad basada en eventos por 100 palmas observadas

$$Intensidad_{pc100} = (E_{pc} / P_{obs}) \times 100$$

Proporción de casos nuevos

$$Pct_{nuevo} = (E_{nuevo} / E_{pc}) \times 100$$

4.3.4 Variables espaciales para inferencia (Moran y LISA)

- Índice global de Moran (Moran_I)

Tipo: estadístico inferencial

Unidad de análisis: mes

Interpretación: grado de autocorrelación espacial global entre predios.

- Significancia estadística (p_sim / valor_p)

Tipo: inferencial

Interpretación: evidencia contra la hipótesis de aleatoriedad espacial.

- Clúster LISA (cluster_lisa)

Tipo: categórica

Categorías: Alto–Alto, Bajo–Bajo, Alto–Bajo, Bajo–Alto, No significativo

Unidad: predio–mes

Uso: identificación de hotspots, coldspots y outliers espaciales.

Nota metodológica

Debido a la cobertura espacial parcial de los censos, el número de predios incluidos en cada mes (n_{predios}) puede variar. Por esta razón, en los resultados de autocorrelación global y local se reporta explícitamente el tamaño muestral por periodo, y se evita la comparación directa entre meses sin considerar las diferencias en cobertura.

4.4 Marco legal

El marco legal que orienta esta investigación contempla normas sobre protección de datos personales, manejo de información pública, tratamiento y uso de datos estadísticos agrícolas, así como lineamientos específicos del Instituto Colombiano Agropecuario (ICA) relacionados con la gestión y difusión de información del sector agropecuario.

4.4.1 Legislación general sobre protección de datos personales en Colombia

En Colombia, la protección de datos personales está regulada por un conjunto de normas que buscan garantizar los derechos de los titulares sobre sus datos, así como establecer responsabilidades para quienes recolectan y tratan dicha información. El derecho fundamental al

habeas data está consagrado en el artículo 15 de la Constitución Política de Colombia, donde se establece que toda persona tiene derecho a conocer, actualizar y rectificar la información que repose en bases de datos y está regulado por la Ley 1581 de 2012, cuyo propósito es dictar disposiciones generales para la protección de datos personales, garantizando que los datos sean tratados de manera lícita, segura y con respeto a la intimidad de las personas (Congreso de la República de Colombia, 2012).

El Decreto 1377 de 2013 reglamenta parcialmente la Ley 1581 de 2012 y define procedimientos para la autorización, almacenamiento, uso, circulación y supresión de datos personales, así como los requisitos que deben cumplir las entidades que actúan como responsables o encargadas del tratamiento de la información (Presidencia de la República de Colombia, 2013).

Estas normas establecen que cualquier tratamiento de datos personales requiere autorización expresa del titular, quien tiene derecho a conocer, actualizar, rectificar, suprimir y limitar el uso de sus datos, además de controlar su divulgación.

El marco general de protección también se complementa con normas como la Ley 1266 de 2008, que regula el manejo de información contenida en bases de datos personales, incluyendo aspectos de reporte y tratamiento de información financiera, y la Ley 1273 de 2009, que modifica el Código Penal para tipificar delitos informáticos relacionados con la vulneración de datos (Congreso de la República de Colombia, 2009).

Para investigaciones basadas en datos georreferenciados de plantaciones o censos sanitarios, las normas de protección de datos personales se aplican cuando la información puede identificar directa o indirectamente a personas naturales (por ejemplo, propietarios, trabajadores o responsables de predios). En estos casos, el tratamiento de datos debe respetar los principios de

legalidad, finalidad, veracidad o calidad, transparencia, acceso y circulación restringida, seguridad y confidencialidad.

4.4.2 Normatividad sobre manejo de información en el sector agrícola

En el entorno agrícola colombiano, la gestión de información técnica y estadística también está regulada por normas que buscan garantizar su calidad, transparencia y uso responsable.

4.4.2.1 Ley de transparencia y datos abiertos. La Ley 1712 de 2014 sobre Transparencia y Acceso a la Información Pública establece que los datos primarios o sin procesar que se encuentren en formatos estándar e interoperables deben ser puestos a disposición de la ciudadanía para su reutilización libre, salvo excepciones legales. Esto incluye información generada por entidades públicas relacionadas con el sector agrícola, siempre que no vulnere derechos de terceros ni comprometa la protección de datos personales (Congreso de la República de Colombia, 2014).

4.4.2.2 Lineamientos del ICA sobre uso y confidencialidad de la información estadística. El Instituto Colombiano Agropecuario (ICA), como autoridad sanitaria y fitosanitaria del país, ha adoptado políticas internas y condiciones de uso para la información estadística que produce y publica. Estas condiciones están alineadas con estándares de calidad estadística y de gestión documental, y establecen que la información debe mantenerse confidencial conforme a la normativa vigente de protección de datos personales.

Además, el ICA publica y actualiza políticas de privacidad y protección de datos, las cuales se aplican a la recolección, almacenamiento, procesamiento y circulación de información que contiene datos personales, en cumplimiento de la legislación colombiana en la materia.

4.4.3 Normatividad técnica del ICA relativa al sector agropecuario

Aunque el ICA no regula directamente la investigación estadística académica, sí tiene responsabilidad sobre los registros y bases de datos del sector agropecuario que se generan a través de censos, muestreos y sistemas de vigilancia fitosanitaria. Esto incluye, por ejemplo, la gestión de registros de cultivos y control de insumos agrícolas, que tienen implicaciones normativas para la recolección y veracidad de la información, así como para la responsabilidad de las entidades y productores frente a la calidad de los datos aportados al sistema (Instituto Colombiano Agropecuario (ICA), s.f.).

De manera complementaria, el Decreto 1071 de 2015, que compila la normatividad del sector agropecuario, contiene disposiciones sobre la verificación y validación de la información frente a parámetros técnicos y ambientales para el registro de plantaciones y productos agrícolas, lo cual representa una base legal para la exigencia de información veraz y conforme a normativa en procesos de levantamiento de datos (Presidencia de la República de Colombia, 2015).

4.5 Técnicas de análisis

4.5.1 Enfoque general del análisis espacio-temporal

El análisis espacial se desarrolló mediante un esquema de Análisis Exploratorio de Datos Espaciales (AEDE) aplicado de manera independiente para cada periodo mensual del año de estudio. Este enfoque permite examinar la distribución espacial de la intensidad de la Pudrición de Cogollo (PC) en los predios evaluados y analizar cómo estos patrones cambian a lo largo del tiempo.

En términos metodológicos, el procedimiento consiste en la aplicación repetida de estadísticos de autocorrelación espacial global y local para cada mes, permitiendo evaluar la evolución temporal de los patrones espaciales de la enfermedad. Para cada periodo mensual se estimó el Índice global de Moran (Moran's I) con el fin de determinar si la distribución espacial de la variable presenta autocorrelación espacial significativa. Posteriormente, se calcularon los Indicadores Locales de Asociación Espacial (LISA) con el objetivo de identificar la localización específica de agrupamientos espaciales de alta o baja intensidad de la enfermedad.

De esta manera, el procedimiento analítico puede representarse conceptualmente como una secuencia de análisis espaciales independientes en el tiempo:

Mes 1 → Moran global + LISA

Mes 2 → Moran global + LISA

Mes 3 → Moran global + LISA

...

Este enfoque permite comparar los resultados obtenidos entre periodos y analizar la evolución temporal de los patrones espaciales de la enfermedad, identificando meses en los cuales se presentan mayores niveles de autocorrelación espacial o cambios en la localización de los conglomerados espaciales.

4.5.2 Preprocesamiento espacio-temporal

El preprocesamiento de los datos constituye una etapa crítica para asegurar la validez de la inferencia espacial. Este proceso incluye las siguientes actividades:

4.5.2.1 Agregación temporal. Los registros individuales de campo se agregan a nivel mensual, utilizando el mes de la visita como unidad temporal de análisis.

4.5.2.2 Construcción de geometrías espaciales. Cuando se dispone únicamente de puntos georreferenciados, se generan polígonos por predio mediante contornos tipo *convex hull*, como aproximación del límite espacial operativo.

Cuando existe cartografía base de predios, esta se utiliza directamente para representar la geometría oficial.

4.5.2.3 Consolidación del GeoDataFrame base. Se construye un GeoDataFrame único para el análisis espacial, con una estructura mínima que incluye:

codigo (identificador del predio),

geometry (polígono o centroide), evitando la incorporación de variables redundantes (por ejemplo, zonas administrativas) que puedan generar duplicidades o errores de combinación (_x/_y) durante los procesos de unión espacial y temporal.

4.5.2.4 Definición de la métrica comparable entre predios. Para garantizar la comparabilidad entre unidades espaciales con distinto número de observaciones, se define como variable principal la intensidad mensual de PC por 100 palmas observadas, calculada a partir de la agregación por predio y mes:

Palmas observadas:

palmas_observadas = nunique(palm_id)

Eventos PC:

$$\text{eventos_pc} = \sum pc$$

- Intensidad mensual:

$$\text{intensidad_pc_x100} = \left(\frac{\text{eventos_pc}}{\text{palmas_observadas}} \right) \times 100$$

4.5.3 Cálculo de índices de autocorrelación espacial

Para cada mes se estiman indicadores de autocorrelación espacial con el fin de evaluar la existencia de patrones no aleatorios en la distribución de la enfermedad.

4.5.3.1 Índice global de Moran (I). El Índice global de Moran se utiliza para medir el grado de similitud espacial global entre predios cercanos. Valores positivos cercanos a +1 indican

agrupamiento espacial (clústeres de valores similares), valores cercanos a 0 sugieren aleatoriedad, y valores negativos indican dispersión. (Moran, 1950)

Dadas las características del área de estudio —predios parcialmente contiguos, presencia de barreras físicas (carreteras, franjas de vegetación) y vacíos espaciales por ausencia de información en algunos predios— los esquemas clásicos de vecindad por contigüidad (Queen o Rook) generan un número elevado de unidades sin vecinos (islas), lo que debilita la inferencia estadística.

4.5.3.2 Decisión metodológica. Se adopta un esquema de vecindad por proximidad (K vecinos más cercanos, KNN), calculado a partir de centroides de los polígonos re proyectados a un sistema de coordenadas métricas (EPSG:3116). Este enfoque garantiza la conectividad de la matriz de pesos espaciales y una interpretación coherente basada en cercanía geográfica efectiva entre predios observados.

La significancia estadística del estadístico se evalúa mediante permutaciones aleatorias, obteniendo valores p empíricos. (Anselin L. , Spatial econometrics: Methods and models, 1988)

4.5.4 Indicadores locales de asociación espacial (LISA)

Para complementar el análisis global, se calculan Indicadores Locales de Asociación Espacial (LISA) de forma mensual. Estos permiten identificar:

- Hotspots (Alto–Alto): predios con alta intensidad de PC rodeados de predios con valores igualmente altos.
- Coldspots (Bajo–Bajo): zonas de baja intensidad espacialmente concentrada.

- Outliers espaciales: predios Alto–Bajo o Bajo–Alto, que evidencian heterogeneidad local. (Anselin L. , 1995)

Se generan mapas LISA mensuales con el fin de visualizar la localización de los focos y analizar su persistencia, desplazamiento o expansión a lo largo del tiempo.

4.5.5 Herramientas tecnológicas

El análisis se desarrolla mediante un flujo reproducible que integra herramientas SIG y de programación:

- Programación y cálculo estadístico:

Python, utilizando librerías especializadas como:

- GeoPandas para manejo de datos espaciales,
- PySAL / ESDA para el cálculo de Moran global y LISA. (Rey, Anselin, Kang, Wolf ,

& Shao, 2023)

- Visualización cartográfica:

QGIS y ArcGIS Pro para la representación espacial de resultados y la elaboración de mapas temáticos.

4.6 Definición de vecindad y pesos espaciales

Dadas la dispersión espacial de los predios y la cobertura parcial de la información, se adopta un esquema de vecindad por K vecinos más cercanos (KNN), definido sobre los centroides de los polígonos en un sistema de referencia métrico (EPSG:3116).

La matriz de pesos espaciales se normaliza por filas, de modo que la contribución total de los vecinos de cada predio sea comparable entre unidades.

Este enfoque asegura conectividad de la matriz de pesos, evita la generación de islas espaciales y permite comparabilidad temporal aun cuando el conjunto de predios con información varía entre meses. (LeSage & Pace, 2009)

4.7 Autocorrelación espacial

El análisis de autocorrelación espacial se estructura en dos niveles complementarios:

- Autocorrelación global (Moran global mensual):

Evalúa si la intensidad de PC presenta un patrón de agrupamiento espacial significativo en cada mes.

- Autocorrelación local (LISA mensual):

Identifica clústeres locales y unidades atípicas mediante pruebas de significancia basadas en permutaciones. (Goodchild, 1986)

Clasificación de clústeres LISA

- Alto–Alto (hotspots)
- Bajo–Bajo (coldspots)
- Alto–Bajo
- Bajo–Alto
- No significativo

4.8 Persistencia de focos

Con el fin de identificar la persistencia temporal de focos de la enfermedad, se realizó un análisis de recurrencia de clústeres espaciales de tipo Alto–Alto (High–High) a lo largo del período de estudio. Para ello, se efectuó un conteo del número de meses en los que cada predio fue clasificado dentro de este tipo de clúster, con base en los resultados del análisis LISA mensual.

A partir de esta información, se construyó un ranking de predios críticos, definido por la frecuencia de aparición en clústeres Alto–Alto, lo cual permite identificar aquellos predios que presentan una mayor recurrencia espacial de la enfermedad y que, por tanto, pueden ser considerados como focos persistentes de riesgo sanitario.

Este análisis constituye una aproximación inicial a la dinámica de persistencia espacial, sujeta a refinamiento en función de una mayor cobertura temporal y espacial de los datos. (Getis & Ord, 1992).

4.9 Sensibilidad y validación

Con el objetivo de evaluar la robustez de los resultados espaciales, se propone la realización de un análisis de sensibilidad asociado a la definición de la vecindad espacial (Goodchild, 1986). En particular, se plantea comparar los resultados obtenidos utilizando distintos valores del parámetro k en el esquema de K vecinos más cercanos (KNN), específicamente $k = 4$ y $k = 6$.

La validación se centrará en analizar la estabilidad de los siguientes indicadores:

- El Índice de Moran global, considerando tanto el signo del estadístico como su nivel de significancia estadística.

- El número y distribución espacial de los clústeres significativos LISA, con énfasis en los focos tipo Alto–Alto.
- El conjunto de predios clasificados como persistentes, evaluando posibles cambios en el ranking de recurrencia.

La interpretación de los resultados se realizará de manera condicionada a la cobertura observada de los datos, reconociendo que variaciones en la disponibilidad de información por mes o por predio pueden influir en la detección y estabilidad de los patrones espaciales identificados.

4.10 Limitaciones de estudio

4.10.1 Distancia entre polígonos

El área de estudio corresponde a un polígono espacial que delimita el territorio en el cual se localizan los predios incluidos en el análisis. Dicho polígono fue construido a partir de la envolvente espacial de los predios evaluados y reproyectado a un sistema de coordenadas métricas (MAGNA-SIRGAS / Colombia Bogotá, EPSG:3116), con el fin de garantizar la precisión en los cálculos espaciales. El área total del polígono es de 711,70 km², valor que se utilizó como referencia para la interpretación de distancias y la configuración espacial general del territorio.

El perímetro del polígono de estudio es de 110,09 km, obtenido como la suma de seis segmentos que conforman el contorno del área. Este valor evidencia la extensión y complejidad geométrica del territorio, caracterizado por una distribución espacial irregular de los predios.

Es importante diferenciar entre el área productiva del cultivo, cercana a 700 hectáreas, y el área del polígono de estudio (711,70 km²), la cual corresponde exclusivamente al contexto espacial que contiene los predios y no representa superficie cultivada.

Figura 2.

Delimitación del área de estudio y distribución espacial de los predios

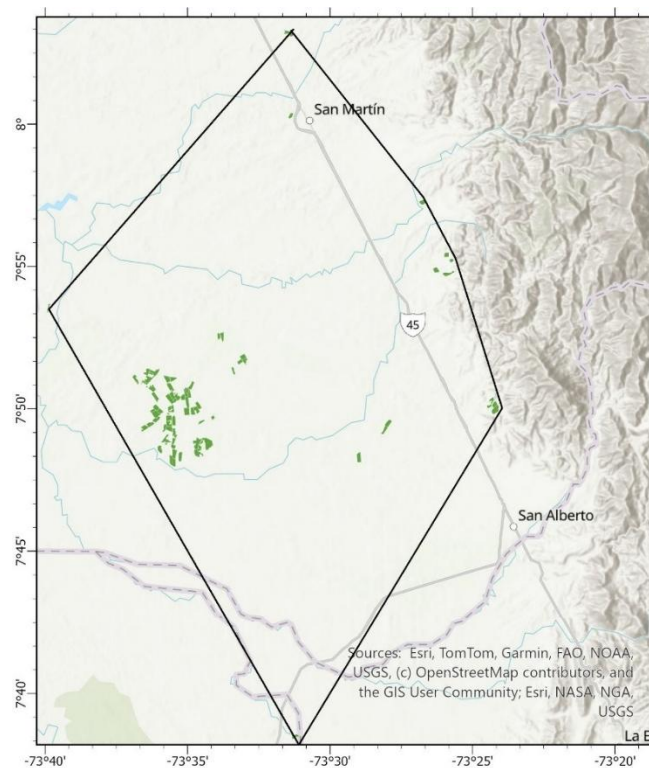


Figura 3.

Vista de distribución mayoritaria de predios sujetos de censo



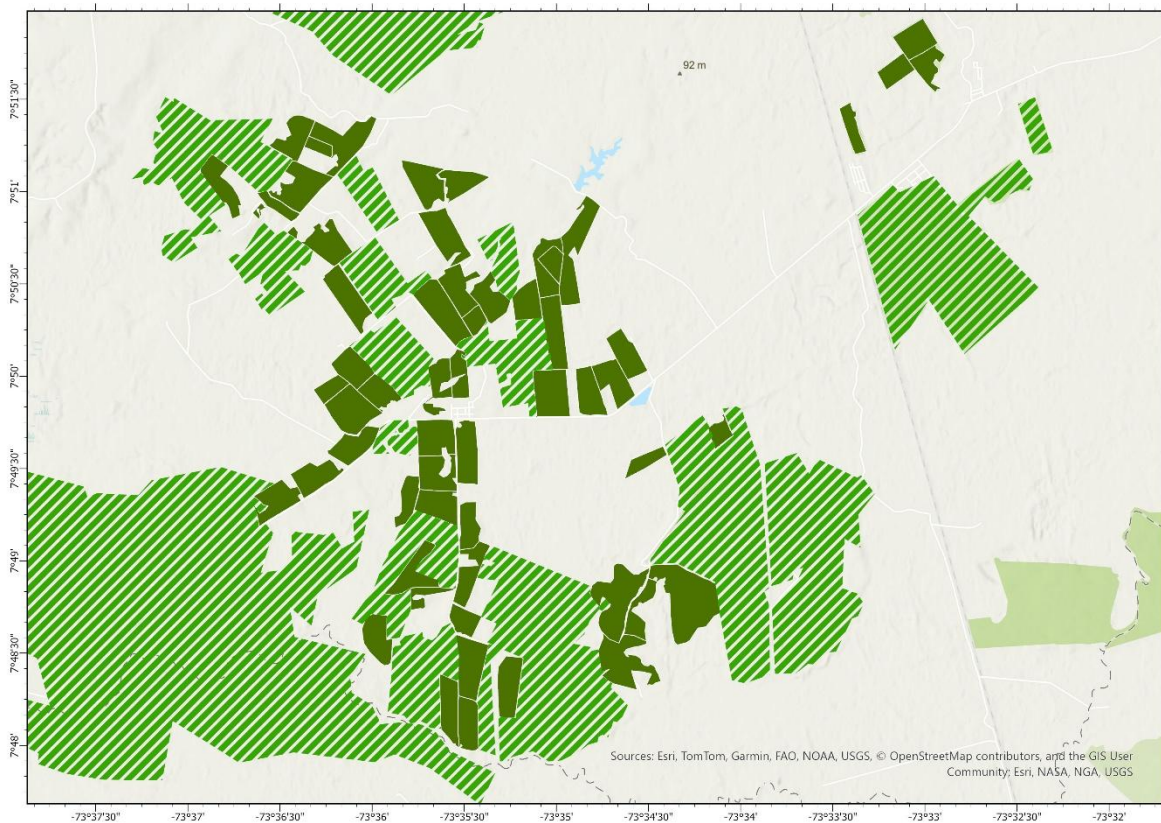
4.10.2 Limitaciones asociadas a la cobertura espacial de la información censal

La información proveniente de censos sanitarios georreferenciados no cubre la totalidad de los cultivos de palma de aceite existentes dentro del área de estudio como se ilustra en la Figura 2, dado que una parte del territorio corresponde a áreas cultivadas con palma que no fueron objeto de censo durante el periodo analizado, representadas mediante un entramado gráfico. En consecuencia, estas áreas no cuentan con información sanitaria disponible y no fueron incluidas en los análisis estadísticos ni espaciales.

Esta limitación implica que los resultados obtenidos reflejan exclusivamente el comportamiento espacial y temporal de los predios censados, y no permiten establecer correlaciones ni inferencias para la totalidad de los cultivos presentes en el área de estudio. Por tanto, los patrones identificados deben interpretarse como representativos del subconjunto de predios con información disponible, y no como una caracterización completa del territorio.

Figura 4.

Distribución espacial de los predios censados y áreas no censadas



Las áreas con entramado corresponden a cultivos de palma de aceite que no fueron objeto de censo durante el periodo de estudio y, por tanto, no cuentan con información sanitaria para el análisis estadístico.

5.5 Plan de Trabajo

Fase 1: Preparación y Estructuración de Datos (Semana 1)

- Depuración de la base de datos Cybertracker.
- Generación de "snapshots" o cortes mensuales de la información.
- Validación de coordenadas y construcción de matrices de vecindad espacial.

Fase 2: Análisis Estadístico Espacial (Semana 2)

- Cálculo del Índice de Moran Global para cada mes del año 2025.
- Pruebas de significancia estadística (p-valor) para cada índice mensual.
- Cálculo de indicadores locales (LISA) para identificación de clusters específicos.

Fase 3: Análisis de Evolución Temporal (Semana 3)

- Graficación de la curva de evolución de los índices (\$I\$ vs. Tiempo).
- Comparación secuencial de mapas de calor y clusters.
- Interpretación de la dinámica: ¿Expansión, contracción o estacionalidad?

Fase 4: Documentación y Entrega (Semana 3)

- Redacción del análisis de resultados.
- Elaboración de conclusiones basadas en la dinámica espacio-temporal observada.
- Informe final y socialización con ASOPALMAR.

6. Resultados esperados

Se espera que el desarrollo del modelo espacio-temporal permita generar los siguientes resultados:

- Caracterización dinámica de la enfermedad: Un diagnóstico detallado de la evolución de la distribución espacial de la Pudrición de Cogollo (PC), evidenciando cómo los patrones de afectación cambian mes a mes a lo largo del año 2025.
- Series temporales de índices espaciales: Obtención de gráficas de evolución mensual del Índice de Moran (I) que permitirá identificar los períodos en los que la enfermedad presenta una mayor tendencia al agrupamiento espacial o, por el contrario, patrones más aleatorios o dispersos.
- Atlas de riesgo espacio-temporal: Construcción de un conjunto secuencial de mapas temáticos que represente el desplazamiento, expansión o contracción de los focos de infección durante el período de estudio, facilitando una lectura integrada del riesgo sanitario en el territorio.
- Insumos para la toma de decisiones: Identificación de ventanas temporales críticas en las que la autocorrelación espacial alcanza valores elevados, lo cual sugiere momentos óptimos para la implementación de intervenciones masivas (cuando existe fuerte agrupamiento) frente a acciones focalizadas (cuando predominan patrones localizados o aislados).

6.1 Resultados del análisis espacial

A partir del procesamiento y análisis de la información recolectada durante el período de estudio, se obtuvieron los siguientes resultados relacionados con la distribución espacial y temporal de la intensidad de la Pudrición de Cogollo (PC) en los predios evaluados.

1. Se realizó el cálculo mensual de la intensidad de PC por predio, estandarizada por el número de palmas observadas.

2. Se aplicaron estadísticos de autocorrelación espacial global (Índice de Moran) y local (LISA) para cada mes, utilizando esquemas de vecindad basados en K vecinos más cercanos (KNN).

3. Los resultados muestran que en varios meses la autocorrelación espacial global no resultó estadísticamente significativa, mientras que en otros periodos se identificaron agrupamientos espaciales localizados tipo Alto–Alto (hotspots).

4. Para el mes de octubre, el Índice de Moran global no resultó estadísticamente significativo ($p \approx 0,381$), lo cual es consistente con la ausencia de conglomerados espaciales significativos en los mapas LISA correspondientes a dicho mes.

5. Adicionalmente, se identificaron hotspots persistentes, definidos como predios que presentan clasificación Alto–Alto en múltiples meses consecutivos o no consecutivos, lo que sugiere la recurrencia espacial de la enfermedad en determinadas unidades productivas.

6.2 Alcances y limitaciones

- Alcances:

El estudio permite realizar un análisis integrado espacial y temporal de la enfermedad a nivel de predio, así como identificar focos persistentes que constituyen insumos clave para la priorización sanitaria y la planificación de estrategias de control.

- Limitación principal:

La cobertura parcial de la información, variable entre meses, genera discontinuidades espaciales que pueden afectar la detección de patrones. Esta limitación se mitiga mediante el uso de vecindades por proximidad (KNN) y se aborda analíticamente interpretando los resultados como autocorrelación espacial condicionada al subconjunto observado.

- Calidad de la información espacial:

Las coordenadas geográficas fueron depuradas mediante procesos de limpieza y aplicación de reglas de plausibilidad espacial, reduciendo errores de georreferenciación y fortaleciendo la confiabilidad del análisis.

7. Productos esperados

Como resultado del desarrollo metodológico y analítico del estudio, se generarán los siguientes productos:

- Base de datos consolidada a nivel predio–mes, que incluya los indicadores de intensidad de Pudrición de Cogollo (PC), estructurada para su análisis espacial y temporal.
- Tabla de resultados de autocorrelación espacial global, con el Índice de Moran calculado para cada mes, incluyendo el valor del estadístico, su nivel de significancia (p-value) y el número de predios analizados (n).
- Capas geográficas de autocorrelación espacial local (LISA) generadas para cada mes, disponibles en formatos interoperables (GPKG y/o GeoJSON) para su visualización y análisis en plataformas SIG como QGIS.
- Ranking de predios con hotspots persistentes, construido a partir del conteo de ocurrencias en clústeres Alto–Alto a lo largo del período de estudio, acompañado de su evolución temporal mensual.

8. Recursos y cronograma

8.1 Recursos

- Datos: Base histórica Cybertracker 2025.
- Software: Python, ArcGIS, QGIS (Open Source).
- Hardware: Equipo de cómputo estándar para procesamiento estadístico.

9. Justificación técnica

La aplicación de métodos de estadística espacial en el análisis de la Pudrición de Cogollo (PC) requiere decisiones metodológicas explícitas que garanticen la validez y la interpretabilidad de los resultados. En este contexto, la presente propuesta se justifica técnicamente por las siguientes razones:

- El Índice de Moran, como medida de autocorrelación espacial, exige una definición formal de la vecindad espacial; una especificación inadecuada de dicha vecindad puede conducir a resultados estadísticamente inválidos o de difícil interpretación.
- El uso de zonificaciones no geográficas (por ejemplo, divisiones administrativas u operativas que no reflejan proximidad espacial real) puede inducir autocorrelación espuria, al forzar relaciones entre unidades que no son vecinas en el espacio físico.
- La redistribución espacial de la información, basada en coordenadas geográficas reales y en la construcción de centroides métricos, mejora la consistencia de la matriz de pesos espaciales, elemento central para la inferencia estadística.
- La adopción de esquemas de vecindad por proximidad espacial permite garantizar la conectividad de la matriz de pesos, evitando la aparición de “islas” espaciales y fortaleciendo la validez estadística de los contrastes de autocorrelación.
- Estas decisiones metodológicas contribuyen a una mejor identificación e interpretación de patrones espaciales reales, diferenciando agrupamientos genuinos de artefactos derivados de la estructura de los datos.

- La disponibilidad de coordenadas geográficas a nivel de palma observada constituye un activo clave, ya que permite integrar el análisis epidemiológico tradicional con herramientas de estadística espacial, generando evidencia objetiva para la priorización de predios críticos, la identificación de meses con mayor concentración de eventos y la evaluación de la persistencia de focos.

- Finalmente, considerando que la cobertura espacial es parcial y los predios se encuentran dispersos, la propuesta aporta valor al plantear una metodología robusta y replicable, sustentada en vecindades por proximidad (KNN), análisis de sensibilidad respecto al número de vecinos (k) y evaluación mensual, produciendo resultados interpretables y directamente aplicables a la gestión fitosanitaria del cultivo.

10. Cronograma simplificado

Se ajusta a 12 semanas según el plan original, pero enfocado en las nuevas fases.

Tabla 3.

Cronograma

Actividad	Semana 1	Semana 2	Semana 3
Estructuración de datos mensuales	●		
Cálculo Índices Moran	●	●	
Análisis de series temporales		●	●
Generación de mapas evolutivos			●
Informe Final			●

11. Resultados

11.1 Implementación de la herramienta de captura y origen de la información

Durante el año 2021 se desarrolló una plantilla de captura de información fitosanitaria utilizando la herramienta CyberTracker, titulada “*Diseño de una plantilla con la herramienta CyberTracker para la captura de información de enfermedades en cultivos de palma africana de proveedores aliados a Palmas del Cesar S.A.*”, en el marco de un Trabajo de Grado para optar al título de Profesional en Producción Agroindustrial.

La herramienta fue diseñada con el objetivo de facilitar la captura sistemática y estandarizada de información georreferenciada, relacionada con la localización de palmas enfermas, el tipo de enfermedad, el grado de severidad y el tipo de caso reportado (nuevo o anterior). De esta manera, se estableció un sistema continuo de registro de eventos sanitarios en campo, con capacidad de seguimiento temporal y análisis espacial. (Valbuena, 2021) en la Tabla 4 se establece la descripción de las variables principales que hacen parte de la herramienta.

Tabla 4.

Tabla exportada por Cybertracker en formato .xlsx

NOMBRE DEL PREDIO																											
PASE N° XXX- EVALUADOR: XXX																											
FECHA	CÓDIGO	EVALUADOR	N° PASE	LOTES	LINEA	PALMA	ORIENTACION	UBICACION	ENFERMEDAD	GRADOS DE	OTRO	SINTOMATOL	CASO	NO	PENDIENTE	PENDIENTE	EN	RECUPERACIÓ	RECUPERACIÓ	REINCIDENTE	REINFECTADA	DE ALTA	ELIMINADA	OBSERVACION	Latitude	Longitudo	ESTADO

Nota. Información proporcionada por ASOPALMAR

La información recolectada es consolidada diariamente y, al finalizar la jornada, se descarga en formato .xlsx para su análisis tabular y en formato .ctx, propio del software, el cual permite la visualización espacial de los predios y de las palmas afectadas mediante mapas.

Este proceso de recolección de información se realiza de manera continua a lo largo del mes por parte de Palmas del Cesar S.A., entidad encargada del levantamiento de la información en campo. Posteriormente, los registros consolidados son enviados a ASOPALMAR para su almacenamiento, seguimiento y análisis. En condiciones ideales, se espera que cada predio sea visitado al menos una vez al mes, con el fin de garantizar una cobertura temporal adecuada del monitoreo fitosanitario.

Sin embargo, para el desarrollo del presente proyecto de grado no se cuenta con información completa y homogénea para todos los predios. De los 76 predios asociados, únicamente 9 predios cuentan con registros correspondientes a los doce meses del año 2025. Adicionalmente, 12 predios fueron visitados durante 11 meses, 16 predios durante 10 meses, y los 38 predios restantes presentan registros en nueve meses o menos.

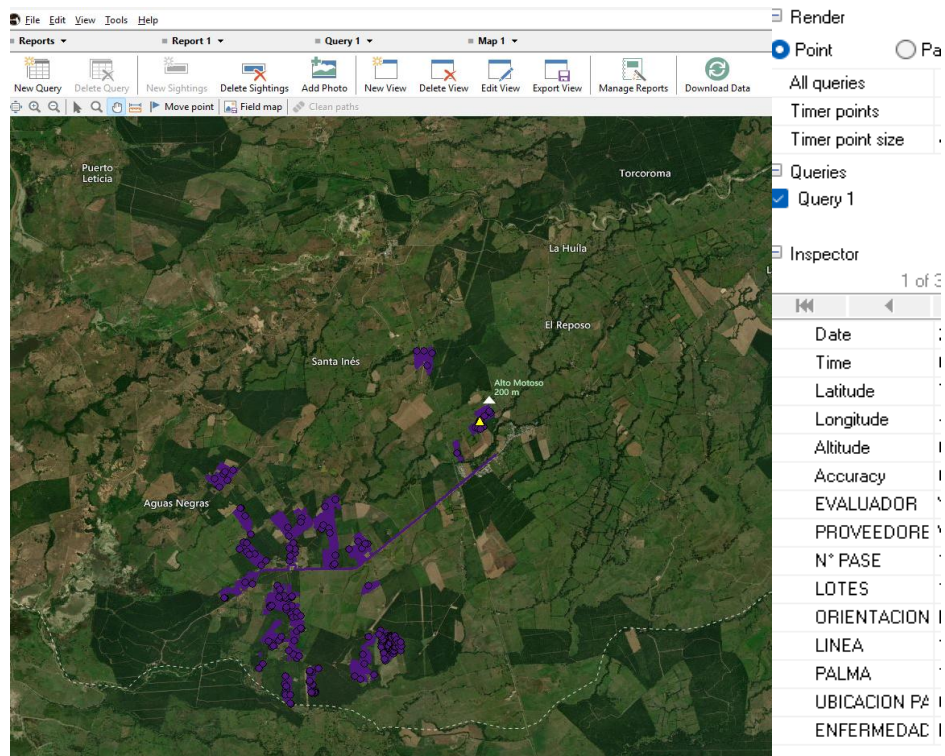
Esta distribución evidencia una cobertura temporal desigual en el monitoreo de los predios y pone de manifiesto que no se dispone de un registro pormenorizado y sistemático de la información recibida para todos los predios a lo largo del año, lo cual constituye una limitación relevante para los análisis espacio-temporales desarrollados en este estudio.

A pesar de esta limitación, la georreferenciación de los eventos sanitarios permite la realización de análisis espaciales mediante esquemas de vecindad adecuados, lo que posibilita la identificación de patrones de distribución, focos recurrentes de la enfermedad y dinámicas espaciales relevantes para el control fitosanitario.

La información recolectada mediante CyberTracker constituye la base de datos utilizada para el presente estudio y corresponde exclusivamente a palmas con algún grado de afectación, lo cual condiciona la interpretación de los indicadores sanitarios derivados.

Figura 5.

Visualización de los datos recogidos a través de la herramienta Cybertracker



Nota. Información proporcionada por ASOPALMAR

Descripción: Vista del reporte periódico a todos los predios, incluye visualización, y georreferenciación de cada punto geolocalizado (Palma con algún evento)

Tabla 5.

Datos exportados por el software Cybertracker

Variable	Descripción
Fecha	Fecha en la cual se realizó la inspección
Código	Código de identificación del predio
Evaluador	Nombre del encargado de realizar la inspección
Nº pase	Hace referencia al consecutivo del censo que se está realizando
Lotes	Numeración interna que ha dispuesto el propietario a la plantación

Variable	Descripción
Línea	Aquí se debe reportar de forma creciente el número de la línea del cultivo donde se está haciendo el registro
Palma	Aquí se debe reportar de forma creciente el número de la palma del cultivo donde se está haciendo el registro
Orientación lote	Hace referencia a la ubicación del lote según el plano cartesiano. Las opciones en este ítem son: Norte, Sur, Oriente, Occidente
Ubicación palma	Hace referencia a la ubicación de la palma según el plano cartesiano. Las opciones en este ítem son: Norte, Sur, Oriente, Occidente
Enfermedades	Descripción de la enfermedad encontrada en la palma
Grados de severidad	Grado de afectación de la enfermedad detectada (1 a 5)
Otro disturbio	Otro disturbio encontrado n relacionado en la opción de enfermedad
Sintomatología	Si el caso fue confirmado
Caso	Si el caso es anterior o nuevo
No evoluciona	Hace referencia a casos donde la enfermedad no evoluciona, pero persiste. Solo se marca con "x" si aplica
Pendiente por tratar	Hace referencia a casos donde aún no se le ha tratado según los protocolos y procedimientos para cada enfermedad. Solo se marca con "x" si aplica
Pendiente por eliminar	Hace referencia a los casos que está pendientes por eliminar. Se marca con una x si el estado corresponde
En recuperación	Hace referencia a los casos que han ido evolucionando satisfactoriamente, pero que aún mantienen la sintomatología. Solo se marca con "x" si aplica
Recuperación e.e	Hace referencia a los casos que han ido evolucionando satisfactoriamente, pero que aún mantienen la sintomatología. Solo se marca con "x" si aplica
Recuperación e.s	Hace referencia a los casos que han ido evolucionando satisfactoriamente, pero que aún mantienen la sintomatología. Solo se marca con "x" si aplica
Reincidente	Hace referencia a los casos que han empeorado en su criticidad. Solo se marca "x" si aplica
Re infectada	Se refiere a los casos que se había curado, dados de alta y de nuevo se enferman. Solo se marca "x" si aplica
De alta	Hace referencia a los casos que se han recuperado y por lo cual se dan de alta. Se marca con una x si el estado corresponde
Eliminada	Hace referencia a los casos que nunca se recuperaron y cuya afectación fue letal para la palma e implico eliminarla. Solo se marca "x" si aplica
Observaciones	

Variable	Descripción
Latitud	Distancia angular norte o sur del Ecuador. De la palma sujeto de inspección
Longitud	Distancia angular este u oeste del Meridiano de Greenwich. De la palma sujeto de inspección
Estado	Tabulación de los estados

Nota. Conceptos tomados del proyecto de grado: “Diseño de una plantilla con la herramienta Cybertracker para la captura de información de enfermedades en cultivos de palma africana de proveedores aliados a Palmas del Cesar S.A.”. Jenny Carolina Cardona Ariza y Odair Mora Valbuena

11.2 Descripción y delimitación del área de estudio por zonas productivas

Con base en la información recopilada durante el año 2025, se desarrolló el presente análisis. En primera instancia, se elaboraron resúmenes descriptivos orientados a caracterizar la estructura espacial del área de estudio, identificar patrones generales y establecer una línea base para los análisis posteriores.

Tabla 6.

Distribución por hectárea (Ha) de cada zona administrativa

Ha Zona	Area (Ha)	Porc. HA por zona
Campo Alegre	131	16,69%
Candelía	213,5	27,21%
Exterior	102	13,00%
Holanda	210	27,76%
La curva	128,2	16,34%
Total	784,7	100%

La variable *Ha zona* corresponde al área total sembrada acumulada para los predios de cada zona, mientras que *Porc. HA por zona* indica la participación relativa de dicha área respecto al total del estudio, calculada como:

$$\%HA_z = \frac{HA_z}{\sum_z HA_z} \times 100$$

Los resultados indican que Candelia (27,21%) y Holanda (27,76%) concentran la mayor proporción del área cultivada, seguidas por Campo Alegre (16,69%) y La Curva (16,34%). La zona Exterior presenta la menor participación relativa (13,00%). Esta distribución resulta relevante para interpretar posteriormente las diferencias en el esfuerzo de monitoreo y en los indicadores sanitarios.

11.3 Intensidad de seguimiento: promedio de visitas por palma

Un registro corresponde a cada observación consignada en la base de datos (visita, seguimiento o anotación sanitaria), mientras que palmas únicas representa el número de individuos distintos observados durante el periodo, calculado mediante el conteo de identificadores irrepetibles (*palm_id*). En consecuencia, una misma palma puede generar múltiples registros si fue observada en diferentes momentos.

A partir de estas métricas se calculó el promedio de visitas por palma, definido como:

$$\text{Promedio de visitas por palma} = \frac{\text{Registros}}{\text{Palmas únicas}}$$

En 2025, este indicador osciló entre 9,37 y 11,77 visitas por palma. La zona La Curva presentó la mayor intensidad de seguimiento (11,77), seguida por Exterior (10,41) y Candelia

(9,99). Por el contrario, Holanda registró el menor valor (9,37), mientras que Campo Alegre mostró un comportamiento intermedio (9,76).

Es importante señalar que estos valores reflejan únicamente la intensidad de registro bajo la cobertura disponible, y no un esquema de muestreo probabilístico o exhaustivo.

Tabla 7.

Clasificación de visitas por palmas únicas y registros

Zona	Registros	Palmas únicas (palm_id)	Promedio visitas por palma
Campo alegre	37312	3823	9,759874
Candelia	48658	4873	9,985225
Exterior	34422	3308	10,405683
Holanda	56006	5980	9,365552
La curva	36113	3067	11,774698

La Tabla 7 presenta la clasificación de visitas por zona, diferenciando entre número total de registros y número de palmas únicas observadas.

11.4 Cobertura del monitoreo fitosanitario y esfuerzo de muestreo

En este apartado se presentan los resultados relacionados con la cobertura del monitoreo fitosanitario y el esfuerzo de muestreo realizado durante el período de estudio, con el fin de contextualizar e interpretar adecuadamente los indicadores derivados del número de palmas enfermas y sanas.

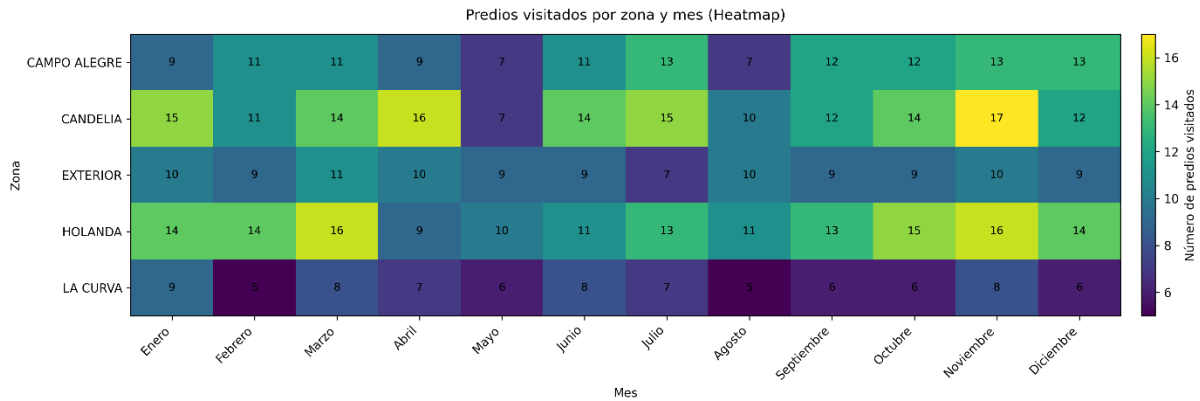
La Tabla 8 presenta el número de predios visitados por zona y mes durante el año de análisis.

Tabla 8.*Número de predios visitados por zona y mes*

Zona	Meses											
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Campo alegre	9	11	11	9	7	11	13	7	12	12	13	13
Candelía	15	11	14	16	7	14	15	10	12	14	17	12
Exterior	10	9	11	10	9	9	7	10	9	9	10	9
Holanda	14	14	16	9	10	11	13	11	13	15	16	14
La curva	9	5	8	7	6	8	7	5	6	6	8	6

Los resultados evidencian que la cobertura del monitoreo fue heterogénea, tanto en el tiempo como entre zonas. A nivel temporal, el número total de predios visitados por mes varió considerablemente, con mínimos en mayo y agosto, y máximos en marzo y noviembre.

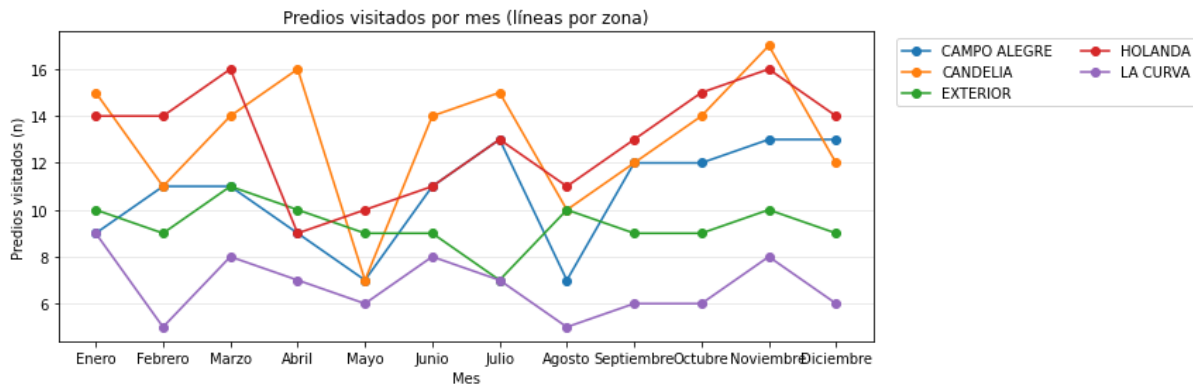
Desde el punto de vista espacial, Candelía y Holanda concentraron el mayor número de visitas, coherente con su mayor participación en el área sembrada. En contraste, La Curva y Exterior presentaron los niveles más bajos de cobertura, reflejando un monitoreo menos continuo.

Figura 6.*Mapa de calor, predios visitados*

La figura 7 presenta el número de predios visitados por zona y mes, evidenciando una cobertura heterogénea del monitoreo fitosanitario. CANDELIA y HOLANDA concentran los mayores niveles de seguimiento durante el año, con picos en noviembre, mientras que LA CURVA presenta la menor intensidad de visitas y valores consistentemente bajos. EXTERIOR muestra un patrón más estable, con variaciones moderadas. Esta heterogeneidad en la cobertura constituye un elemento clave para la interpretación de los indicadores sanitarios posteriores, dado que el volumen de registros y la magnitud observada de la enfermedad dependen del número de predios efectivamente visitados en cada período.

Figura 7.

Gráfico de líneas, predios visitados periodo anual



El gráfico de líneas evidencia la evolución mensual del número de predios visitados por zona, mostrando diferencias claras tanto en nivel como en variabilidad entre las zonas analizadas.

Las zonas CANDELIA y HOLANDA presentan los niveles más altos de cobertura a lo largo del año, con valores que oscilan aproximadamente entre 11 y 17 predios visitados. En ambas zonas se observan picos hacia el último trimestre, particularmente en noviembre, lo que sugiere una intensificación del esfuerzo de monitoreo en este periodo.

CAMPO ALEGRE muestra un comportamiento intermedio, con una cobertura relativamente estable durante el año y un incremento moderado hacia el segundo semestre. Este patrón indica un seguimiento constante, aunque menos intenso que en CANDELIA y HOLANDA.

Por su parte, EXTERIOR presenta una menor variabilidad, con valores cercanos a 9–11 predios en la mayoría de los meses, lo que sugiere un monitoreo más uniforme pero de menor intensidad relativa. En contraste, LA CURVA evidencia los valores más bajos y la mayor irregularidad, con mínimos en febrero y agosto, reflejando una cobertura limitada y menos consistente.

En conjunto, este gráfico confirma la heterogeneidad espacial del esfuerzo de muestreo, lo cual resulta clave para interpretar las diferencias observadas posteriormente en los indicadores sanitarios por zona.

Figura 8.

Esfuerzo global de monitoreo por mes



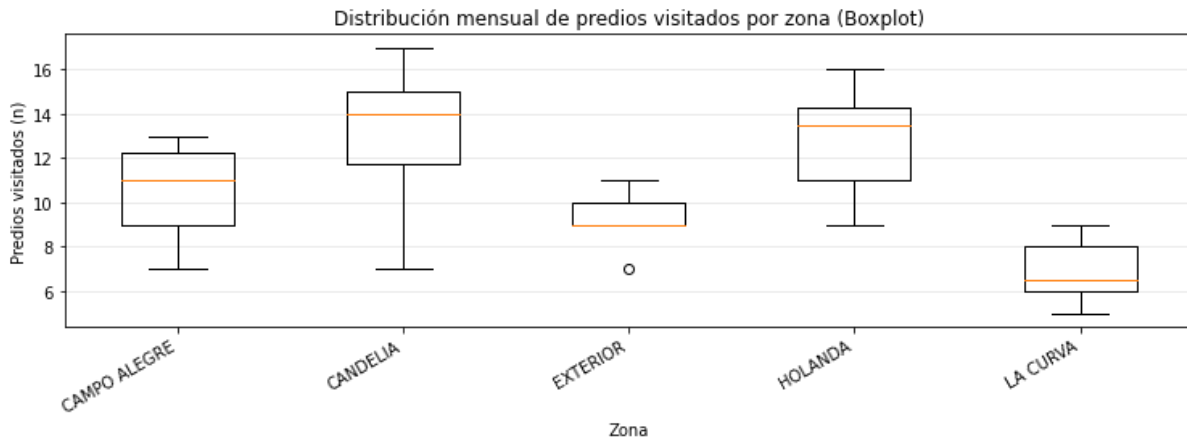
El gráfico de barras resume el esfuerzo global de monitoreo por mes, integrando todas las zonas. Se observa que el número total de predios visitados varía de forma considerable a lo largo del año, con un mínimo en mayo y un máximo en noviembre.

Este patrón indica que el monitoreo no se distribuyó de manera uniforme en el tiempo, sino que presentó fluctuaciones operativas que pueden responder a factores logísticos, climáticos o de planificación. La concentración del mayor número de visitas hacia el final del año coincide con los picos observados en las zonas con mayor cobertura, reforzando la idea de un incremento general del esfuerzo de muestreo en el último trimestre.

Estas variaciones temporales implican que los indicadores de enfermedad calculados por mes reflejan la intensidad observada bajo diferentes niveles de cobertura, y no necesariamente cambios reales en la dinámica fitosanitaria.

Figura 9.

Boxplot comparativo de distribución y variabilidad de visitas



El boxplot permite comparar la distribución y variabilidad del número de predios visitados por zona a lo largo del año. Se observa que:

CANDELIA y HOLANDA presentan las medianas más altas, así como una mayor dispersión, lo que indica un monitoreo intenso pero con variaciones mensuales.

EXTERIOR muestra una distribución más compacta, con menor dispersión, reflejando un esfuerzo de muestreo más estable en el tiempo.

CAMPO ALEGRE ocupa una posición intermedia, con variabilidad moderada.

LA CURVA presenta la mediana más baja y la menor amplitud, confirmando que fue la zona con menor cobertura y seguimiento más limitado.

La presencia de valores atípicos en algunas zonas sugiere meses con cobertura excepcionalmente baja o alta, los cuales deben ser considerados al interpretar los indicadores sanitarios y al realizar comparaciones entre zonas.

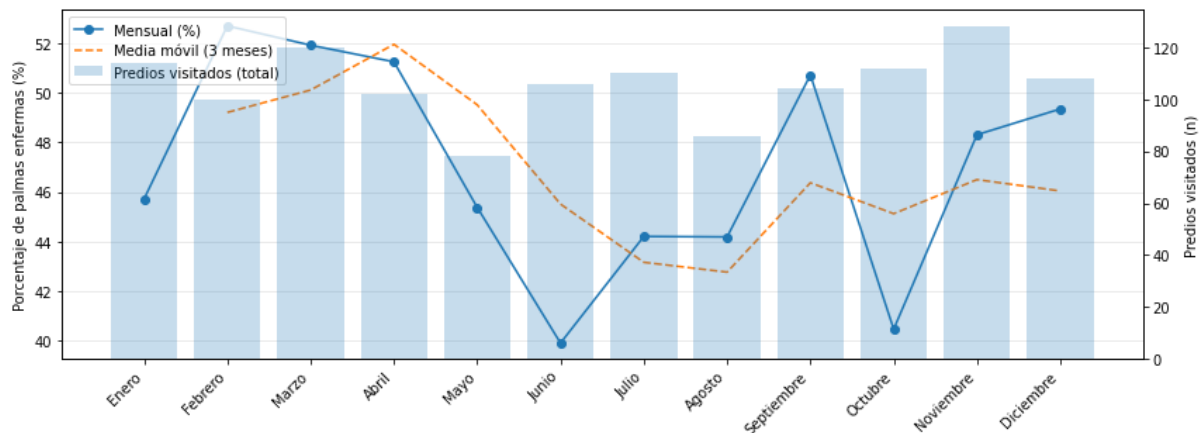
En conjunto, los tres gráficos confirman que el esfuerzo de muestreo fue heterogéneo tanto en el tiempo como en el espacio, con zonas y meses claramente diferenciados en términos de

cobertura. Esta heterogeneidad refuerza la necesidad de interpretar los resultados de enfermedad como intensidad observada bajo la cobertura disponible, y justifica el uso de indicadores normalizados y análisis complementarios (temporales y espaciales) en los apartados siguientes.

Los resultados presentados evidencian que la cobertura del monitoreo fitosanitario durante el período de estudio fue heterogénea tanto en el tiempo como entre zonas, con diferencias marcadas en la intensidad y regularidad de las visitas a predios. Zonas como CANDELIA y HOLANDA concentraron un mayor esfuerzo de muestreo, mientras que LA CURVA presentó una cobertura más limitada y menos consistente. Estas diferencias, junto con las fluctuaciones mensuales en el número total de predios visitados, confirman que los indicadores sanitarios derivados de los censos reflejan la intensidad observada de la enfermedad bajo la cobertura disponible. En consecuencia, este análisis constituye un marco de referencia indispensable para la interpretación de los resultados presentados en los apartados siguientes, en los cuales se abordan el cálculo de enfermedades fitosanitarias específicas y la dinámica temporal y espacial de la Pudrición de Cogollo.

Figura 10.

Porcentaje mensual de palmas enfermas vs. esfuerzo de muestreo (predios visitados)



La Figura 10 complementa esta información al mostrar, de manera conjunta, el porcentaje mensual de palmas enfermas y el número total de predios visitados por mes. La comparación entre ambos indicadores pone de manifiesto que algunas de las fluctuaciones observadas en el porcentaje de palmas enfermas coinciden con variaciones en el esfuerzo de muestreo, particularmente en los meses con menor cobertura. En este sentido, los descensos o incrementos abruptos en el indicador sanitario deben interpretarse considerando el número de predios efectivamente censados en cada mes.

Estos resultados confirman que los indicadores derivados del número de palmas enfermas reflejan la intensidad observada de la enfermedad bajo la cobertura de monitoreo disponible, y no necesariamente la prevalencia real en la totalidad de los predios asociados. Por esta razón, el análisis de la cobertura del monitoreo constituye un elemento fundamental para la correcta interpretación de los resultados temporales y espaciales presentados en los apartados siguientes, así como para la identificación de posibles sesgos asociados a una cobertura desigual del muestreo.

11.5 Estimación del porcentaje de palmas enfermas

Para realizar la comparación entre palmas sanas vs. enfermas es necesario aclarar una limitación de la fuente de datos: en CyberTracker únicamente se registra la ubicación (coordenadas) de las palmas que presentan alguna afectación. En consecuencia, cada punto georreferenciado corresponde a una palma enferma, y no existe un registro explícito de palmas sanas dentro de la base.

Por lo anterior, el porcentaje de afectación no se calcula sobre “palmas registradas”, sino sobre una estimación del total de palmas sembradas en el área de estudio. Para ello, se utiliza el

estándar de densidad de siembra reportado: 167 palmas por hectárea (según información suministrada por Asopalmar). Con esta referencia, el número total de palmas sembradas en un predio i se estima como:

El número total de palmas sembradas en un predio i se estimó como:

$$P_i = HA_i \times 167$$

El porcentaje estimado de afectación se calculó como:

$$\%Afectación_i = \frac{U_i}{P_i} \times 100$$

donde U_i corresponde al número de palmas únicas afectadas.

Este indicador representa una aproximación relativa y no una prevalencia real, ya que asume densidad homogénea y está condicionado a la cobertura del monitoreo.

Nota metodológica: Este indicador no corresponde a una prevalencia real de la enfermedad en el cultivo. Se deriva de una estimación basada en supuestos de densidad de siembra homogénea y está condicionado a la cobertura y el protocolo de registro del sistema Cybertracker, el cual solo captura palmas con afectación.

El “porcentaje de palmas enfermas” hace referencia al “Porcentaje estimado de palmas afectadas registradas, en relación con el total sembrado bajo supuestos” o “Indicador relativo aproximado de la afectación registrada” por lo tanto este valor es un supuesto de estimación (densidad homogénea de 167 palmas/ha).

Tabla 9.

Porcentaje estimado de palmas enfermas

Mes	Palmas enfermas	Palmas sembradas	Porcentaje de palmas enfermas
Enero	14827	32431,4	45,72%
Febrero	13088	24832,9	52,70%

Mes	Palmas enfermas	Palmas sembradas	Porcentaje de palmas enfermas
Marzo	15191	29258,4	51,92%
Abril	12469	24331,9	51,25%
Mayo	10624	23413,4	45,38%
Junio	12943	32431,4	39,91%
Julio	13511	30561	44,21%
Agosto	10383	23496,9	44,19%
Septiembre	12595	24832,9	50,72%
Octubre	13631	33683,9	40,47%
Noviembre	16272	33683,9	48,31%
Diciembre	12419	25166,9	49,35%

Los resultados muestran porcentajes mensuales elevados, entre 39,91% y 52,70%, con un promedio anual cercano al 47%, lo que evidencia un comportamiento persistente de la enfermedad a lo largo del año.

Como CyberTracker registra únicamente palmas con afectación, el conteo mensual del Indicador relativo aproximado de la afectación registrada se obtuvo como el número de palmas únicas con algún evento en el mes:

$$E_m = \text{nunique}(\text{palm_id}) \text{ en el mes } m$$

El total de palmas sembradas se estimó a partir del área (hectáreas) reportada y la densidad de siembra de 167 palmas/ha:

$$S_m = HA_m \times 167$$

Finalmente, el porcentaje de palmas enfermas se calculó como:

$$\% \text{Enfermas}_m = \frac{E_m}{S_m} \times 100$$

donde:

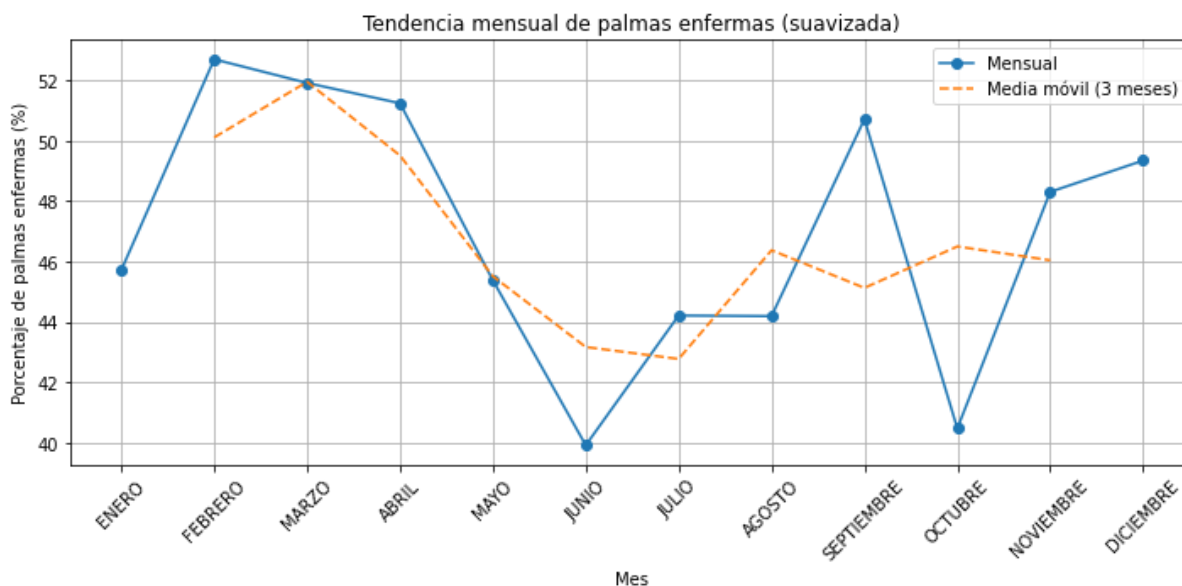
E_m = palmas enfermas (palmas únicas observadas con afectación en el mes),

S_m = palmas sembradas estimadas (según hectáreas y densidad),

HA_m = hectáreas consideradas en el mes.

Figura 11.

Tendencia mensual de palmas enfermas



La Figura 11 muestra la evolución mensual del porcentaje de palmas enfermas y su media móvil de tres meses. La serie evidencia fluctuaciones mensuales con picos a inicios y finales del año y descensos transitorios a mitad del periodo. No obstante, la media móvil indica una intensidad elevada y relativamente estable a lo largo del año, lo que sugiere un comportamiento persistente de la enfermedad. Las variaciones abruptas se asocian, en parte, a cambios en la cobertura del monitoreo y al número de predios censados mensualmente.

La Tabla 9 presenta la distribución mensual de palmas enfermas y el porcentaje de afectación estimado respecto al número de palmas sembradas durante el año de análisis. Los resultados evidencian una alta prevalencia de enfermedad a lo largo de todo el período, con porcentajes mensuales que oscilan entre 39,91% y 52,70%, y un promedio anual cercano al 47%.

Los mayores porcentajes de palmas enfermas se registraron en los meses de febrero (52,70%), marzo (51,92%), abril (51,25%) y septiembre (50,72%), lo que sugiere periodos de mayor presión fitosanitaria o una mayor detección de casos durante estas etapas del año. En contraste, los valores más bajos se observaron en junio (39,91%) y octubre (40,47%), aunque incluso en estos meses la proporción de palmas afectadas se mantiene elevada, lo que confirma el carácter persistente de la enfermedad en los cultivos evaluados.

En términos absolutos, el mayor número de palmas enfermas se registró en noviembre (16.272 palmas), seguido de marzo (15.191 palmas) y enero (14.827 palmas). No obstante, estos valores no coinciden necesariamente con los meses de mayor porcentaje de afectación, lo cual se explica por la variabilidad en el número estimado de palmas sembradas consideradas cada mes, asociada a diferencias en la cobertura del monitoreo y al número de predios censados.

Es importante resaltar que el denominador utilizado para el cálculo del porcentaje de palmas enfermas corresponde a una estimación del número de palmas sembradas, la cual varía mensualmente en función de la información disponible y del número de predios visitados. Dado que no todos los predios fueron censados de manera continua a lo largo del año, estos resultados reflejan la intensidad de la enfermedad bajo la cobertura de monitoreo disponible, y no necesariamente la prevalencia real en la totalidad de los cultivos asociados.

A pesar de esta limitación, la consistencia de porcentajes elevados en la mayoría de los meses indica que la enfermedad presenta un comportamiento endémico, con fluctuaciones temporales moderadas que refuerzan la necesidad de estrategias de monitoreo continuo, priorización espacial de predios con mayor recurrencia y fortalecimiento del registro sistemático de la información para mejorar la precisión de los análisis espacio-temporales futuros.

A partir de la variabilidad mensual observada, el análisis espacial permite determinar si los valores altos de afectación tienden a concentrarse en áreas específicas o si se distribuyen aleatoriamente. Para ello, se aplicó el Índice global de Moran, con el fin de evaluar autocorrelación espacial en la intensidad de la enfermedad, y el análisis local LISA, orientado a identificar clústeres de alta-alta (hotspots), baja-baja y unidades atípicas (alta-baja/baja-alta). Esta aproximación es especialmente relevante en ASOPALMAR, donde los predios están definidos administrativamente y no conforman un bloque geográfico continuo; por lo tanto, la selección del esquema de vecindad (p. ej., distancia fija, k-vecinos más cercanos o contigüidad derivada de polígonos estimados) es determinante para interpretar la conectividad espacial entre predios.

11.6 Cálculo y análisis de enfermedades fitosanitarias específicas

Con base en la caracterización previa de la cobertura del monitoreo fitosanitario y del esfuerzo de muestreo, y teniendo en cuenta la heterogeneidad temporal y espacial en el número de predios visitados, se procede al cálculo y análisis de las enfermedades específicas registradas en los censos. Este análisis se realiza utilizando indicadores normalizados que permiten comparar la ocurrencia de cada enfermedad en el tiempo, considerando el número de palmas observadas bajo la cobertura disponible en cada período.

Se realiza el monitoreo sistemático de las enfermedades detectadas durante los censos fitosanitarios.

Tabla 10.*Censo de enfermedades por registro y porcentaje de afectación*

Enfermedades	Registro	Palmas únicas	% palmas afectadas
Pudrición de cogollo	178493	17929	85,17%
Volcamiento de cogollo	24951	2549	12,11%
Pudrición de estípite	5449	638	3,03%
Colapso de flecha	1764	206	0,98%
Afectada por rayo	442	74	0,35%
Def de boro	300	41	0,19%
Acortamiento	271	30	0,14%
Palma de salida	256	143	0,68%
Lote sin novedad	113	45	0,21%
Daño mecánico	103	23	0,11%
Palmas de entrada	99	58	0,28%
Def nutricional	66	7	0,03%
Dano en la flecha	61	10	0,05%
Otro disturbio	51	8	0,04%
Palma de entrada	46	28	0,13%
Pudrición seca de estípite	19	11	0,05%
Afectada por caída de árbol	14	2	0,01%
Disturbio-marchitez	7	2	0,01%
Pudrición húmeda de estípite	6	3	0,01%

Palmas únicas corresponde al número de palmas distintas (identificadas por `palm_id`) que registraron al menos un evento de la enfermedad en todo el periodo. Un mismo individuo puede registrar múltiples eventos (seguimiento mensual, reincidencia o repetición de registro), por lo que el número de registros puede ser considerablemente mayor que `palmas_unicas`. En consecuencia, el `porcentaje_palmas_afectadas` representa la proporción de palmas que han presentado la enfermedad al menos una vez (prevalencia acumulada en el periodo), no la proporción de eventos ni una tasa sobre el total de palmas sembradas.

Tabla 11.*Pareto de enfermedades (acumulado)*

Enfermedades	Palmas únicas	Porcentaje	% acumulado
Pudrición de cogollo	17929	85,17%	85,17%
volcamiento de cogollo	2549	12,11%	97,28%
Pudrición de estípite	638	3,03%	100,31%
Colapso de flecha	206	0,98%	101,29%
Palma de salida	143	0,68%	101,97%
Afectada por rayo	74	0,35%	102,32%
Palmas de entrada	58	0,28%	102,59%
Lote sin novedad	45	0,21%	102,81%
Def de boro	41	0,19%	103,00%
Acortamiento	30	0,14%	103,14%
Palma de entrada	28	0,13%	103,28%
Daño mecánico	23	0,11%	103,39%
Pudrición seca de estípite	11	0,05%	103,44%
Daño en la flecha	10	0,05%	103,49%
otro disturbio	8	0,04%	103,52%
Def nutricional	7	0,03%	103,56%
Pudrición húmeda de estípite	3	0,01%	103,57%
Disturbio-marchitez	2	0,01%	103,58%
Afectada por caída de árbol	2	0,01%	103,59%

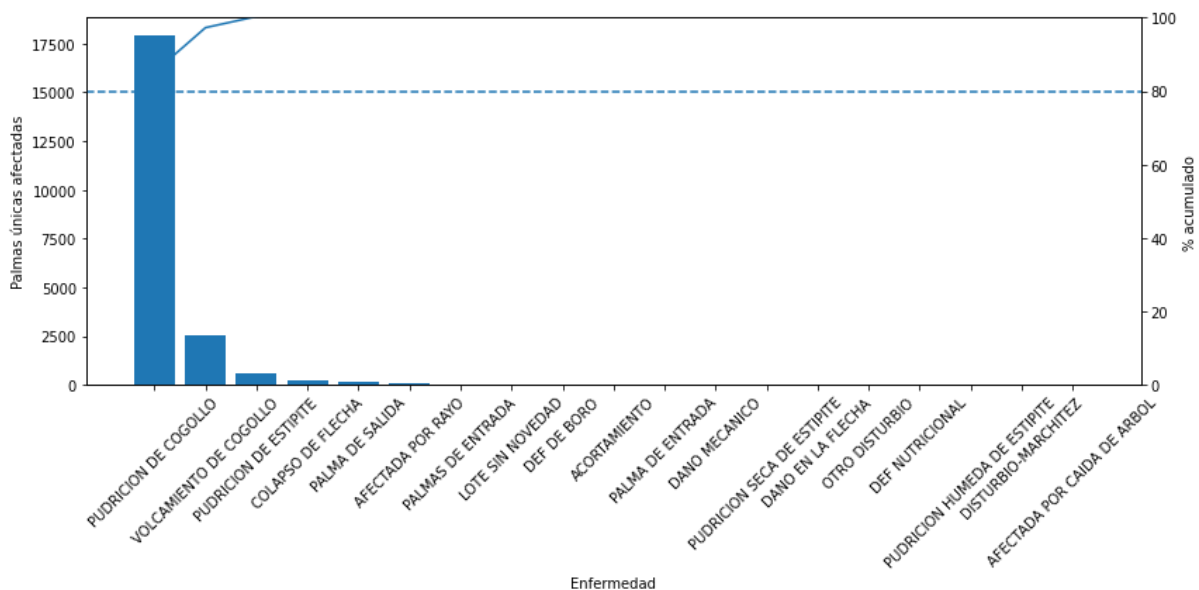
Para cada categoría sanitaria, el número de palmas únicas que presentaron al menos un registro de esa condición durante todo el periodo analizado. El porcentaje corresponde a la proporción de palmas afectadas por esa condición respecto al total de palmas únicas registradas en la base (palma única). Este indicador se interpreta como prevalencia acumulada histórica: “una palma cuenta una sola vez por enfermedad, aunque haya sido registrada múltiples veces en visitas diferentes”.

En los resultados, Pudrición de cogollo concentra la mayor afectación, con 17.929 palmas (85,17%), lo cual evidencia que es la condición dominante en el sistema de monitoreo y la principal fuente de carga sanitaria. En segundo lugar, se ubica Volcamiento de cogollo con 2.549 palmas

(12,11%), seguida por Pudrición de estípites con 638 palmas (3,03%). El resto de las categorías presentan proporciones inferiores al 1%, como Colapso de flecha (0,98%) y Palma de salida (0,68%), mientras que los demás eventos corresponden a ocurrencias puntuales ($\leq 0,35\%$).

Figura 12.

Pareto

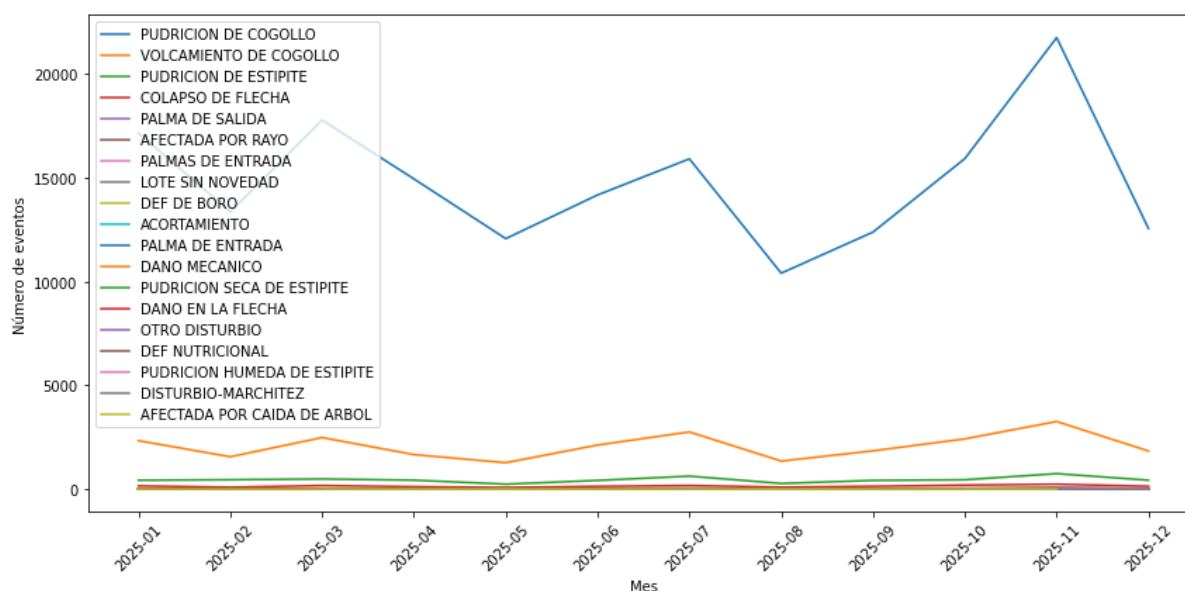


El porcentaje acumulado no representa una partición del 100%, porque las categorías no son mutuamente excluyentes. Es decir, una misma palma puede aparecer como “única” en más de una enfermedad a lo largo del tiempo (o incluso en visitas cercanas), por ejemplo: una palma puede estar en Pudrición de cogollo y posteriormente registrarse como Volcamiento de cogollo, por esta razón, al sumar porcentajes por enfermedad se cuenta superposición entre categorías (co-ocurrencia), y el acumulado puede exceder 100%, el acumulado de 103,59% sugiere que, en términos globales, existe un solapamiento aproximado del orden de 3,59% del total de palmas (palmas que estuvieron registradas en dos o más categorías a lo largo del periodo).

11.7 Tendencia temporal de las enfermedades en el cultivo de palma

Figura 13.

Tendencia temporal de Enfermedades críticas



La Figura 13 presenta la evolución temporal del número de palmas afectadas por las principales enfermedades y disturbios registrados durante el periodo de estudio. Cada serie corresponde al conteo de palmas únicas afectadas por mes, lo que permite comparar la dinámica relativa entre enfermedades y detectar comportamientos persistentes, fluctuaciones y eventos atípicos.

De manera consistente con el análisis de prevalencia acumulada, la Pudrición de cogollo (PC) muestra una tendencia dominante a lo largo de todo el periodo, con valores significativamente superiores al resto de las categorías sanitarias. Aunque se observan fluctuaciones mensuales —con picos y descensos intermedios—, la enfermedad mantiene una presencia sostenida, lo que sugiere un problema estructural y no episódico dentro del sistema productivo. Estas variaciones pueden

asociarse tanto a cambios reales en la afectación como a diferencias en la intensidad del monitoreo y en la frecuencia de visitas.

En segundo orden de importancia se ubica el Volcamiento de cogollo, cuya tendencia presenta valores notablemente inferiores a la PC, pero con un patrón relativamente estable en el tiempo. Su comportamiento sugiere una afectación recurrente, aunque limitada a un subconjunto específico de palmas, posiblemente asociado a condiciones estructurales, fisiológicas o a la progresión de estados avanzados de la enfermedad principal.

La Pudrición de estípote y el Colapso de flecha exhiben tendencias de baja magnitud, con ligeros incrementos en algunos meses, pero sin evidenciar patrones de crecimiento sostenido. Estas enfermedades pueden interpretarse como eventos secundarios o complementarios, que afectan a un número reducido de palmas y no constituyen, de forma aislada, el principal factor de presión sanitaria.

El resto de las categorías —incluyendo Palma de salida, Afectada por rayo, Deficiencias nutricionales, Daños mecánicos y otros disturbios— presentan valores bajos y relativamente estables, característicos de eventos puntuales u operativos. Su contribución al total de palmas afectadas es marginal y no altera la tendencia general del sistema, aunque su seguimiento resulta relevante para la gestión integral del cultivo.

En conjunto, la tendencia temporal confirma que la dinámica sanitaria del cultivo está fuertemente condicionada por la Pudrición de cogollo, tanto en magnitud como en persistencia. Este resultado respalda la decisión metodológica de enfocar los análisis posteriores —incluyendo prevalencia mensual, intensidad de eventos y autocorrelación espacial— en dicha enfermedad, con el fin de identificar patrones espacio-temporales, zonas críticas y focos recurrentes que orienten la priorización del monitoreo y las estrategias de control fitosanitario.

Tabla 12.*Porcentaje de reincidencia de la enfermedad*

Mes	Palmas pc únicas	Palmas pc reincidentes	Max eventos misma palma	Pct reincidencia
Abril	10742	3237	6	30,134053
Agosto	8916	1316	4	14,759982
Diciembre	10407	1956	6	18,795042
Enero	12692	3583	6	28,230381
Febrero	11257	2068	4	18,370792
Julio	11212	4074	6	36,336068
Junio	10769	2872	6	26,669143
Marzo	13077	4153	6	31,758048
Mayo	9270	2149	6	23,182309
Noviembre	13765	6547	6	47,562659
Octubre	11495	3588	6	31,213571
Septiembre	10554	1731	4	16,401364

Se observaron diferencias entre el número de eventos de PC y el número de palmas observadas debido a que una misma palma puede registrar más de un evento dentro del mes (Re observación o reincidencia). Por esta razón se calcularon dos métricas: (i) tasa por eventos (eventos pc por 1000 palmas observadas) como indicador operativo de carga de registros, y (ii) tasa por palmas únicas (palmas pc únicas por 1000 palmas observadas) como indicador epidemiológico de proporción de palmas afectadas.

En particular, se enfatiza en el estudio de las enfermedades de mayor relevancia fitosanitaria, con especial atención a la Pudrición de Cogollo, debido a su alta frecuencia de ocurrencia y su impacto sobre la productividad del cultivo. Los resultados presentados en el siguiente apartado permiten identificar la dinámica temporal de las enfermedades específicas, así como establecer una base cuantitativa para los análisis espaciales y la priorización de acciones de manejo fitosanitario.

El análisis por categorías sanitarias indica que la Pudrición de Cogollo (PC) concentra la mayor afectación, con 85,17% de las palmas únicas, seguida a gran distancia por Volcamiento de cogollo (12,11%) y Pudrición de estípite (3,03%). El resto de las enfermedades presenta proporciones inferiores al 1%.

Es importante resaltar que los porcentajes acumulados superan el 100%, dado que las categorías no son mutuamente excluyentes: una misma palma puede registrar más de una enfermedad a lo largo del tiempo.

11.8 Justificación enfoque centrado en pudrición de cogollo

El análisis de prevalencia acumulada muestra que la PC afecta aproximadamente el 85% de las palmas únicas registradas, superando ampliamente a cualquier otra categoría sanitaria. Este peso relativo convierte a la PC en el principal determinante del estado sanitario del cultivo, mientras que las demás enfermedades presentan ocurrencias marginales o esporádicas.

La elevada frecuencia de registros asociados a la PC garantiza una masa crítica de información suficiente para aplicar técnicas de análisis temporal y espacial con robustez estadística, tales como estimaciones mensuales, análisis de autocorrelación espacial (Moran's I) y detección de conglomerados locales (LISA). En contraste, la baja incidencia de otras enfermedades limita la confiabilidad de este tipo de análisis y aumenta la probabilidad de resultados inestables o no significativos.

Finalmente, desde un punto de vista operativo, la PC representa la principal prioridad fitosanitaria para los productores, debido a su impacto sobre la productividad, la supervivencia de las palmas y los costos de manejo. En este contexto, focalizar el análisis en esta enfermedad

permite orientar de manera más eficiente la identificación de focos de riesgo, la asignación de recursos y la planificación de acciones de control.

En consecuencia, las demás categorías sanitarias se abordan únicamente a nivel descriptivo, mientras que la Pudrición de Cogollo se utiliza como evento trazador para el análisis detallado de la dinámica espacio-temporal del sistema.

La evolución mensual de la PC evidencia un comportamiento altamente persistente, con fluctuaciones moderadas y picos asociados principalmente a reincidencia y seguimiento de palmas previamente afectadas, más que a la aparición de nuevos casos.

El análisis de casos anteriores y nuevos confirma este patrón: más del 98% de los registros corresponden a casos anteriores, y los casos nuevos representan una fracción marginal del total mensual.

11.8.1 Distribución espacial de la intensidad de Pudrición de Cogollo en el área de estudio

Con el fin de identificar patrones preliminares en la distribución espacial de la Pudrición de Cogollo, se elaboró un mapa temático tipo coroplético utilizando como unidad espacial los predios evaluados. La variable representada corresponde a la intensidad_{pc}x100, la cual mide el número de eventos de Pudrición de Cogollo por cada 100 palmas observadas.

Los mapas coropléticos constituyen una herramienta fundamental en el análisis exploratorio de datos espaciales, ya que permiten visualizar la distribución geográfica de una variable cuantitativa y detectar posibles concentraciones espaciales de valores altos o bajos. Esta representación inicial facilita la identificación de áreas con mayor recurrencia de la enfermedad y sirve como base para la aplicación posterior de medidas formales de autocorrelación espacial.

Debido a la escala del mapa, se crearon 4 vistas independientes para una mejor visualización.

Figura 14.

Distribución espacial de la intensidad de Pudrición de Cogollo (intensidad_pc_x100) en los predios evaluados.

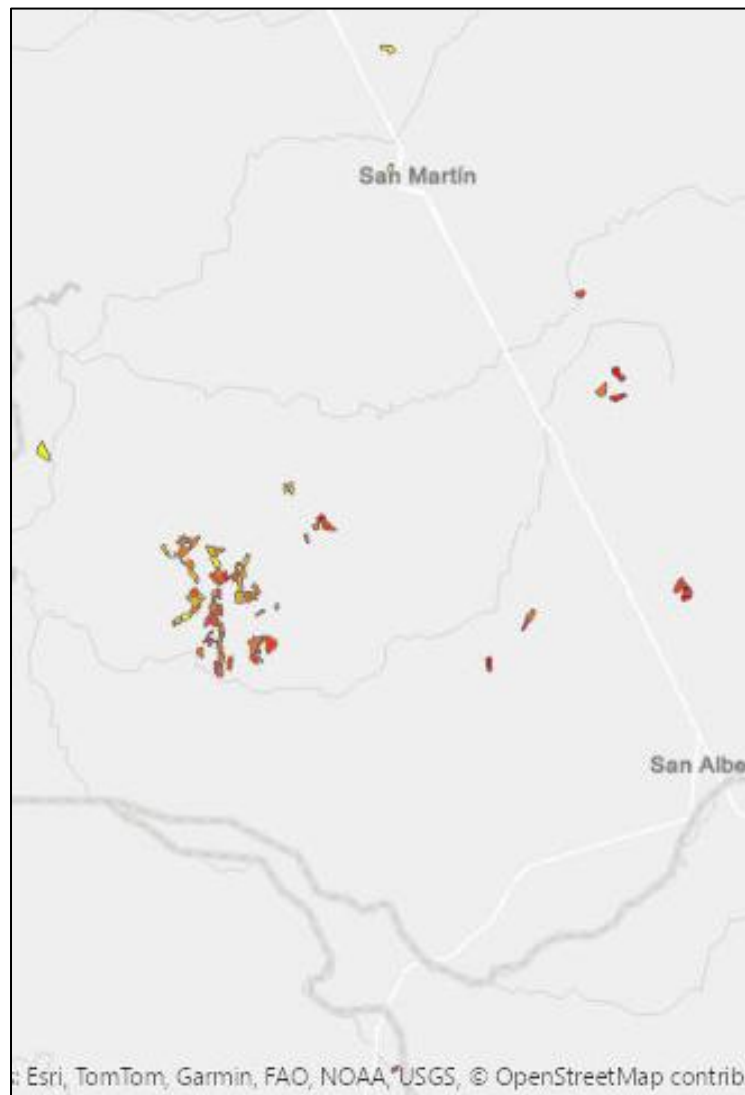


Figura 15.

Distribución espacial de la intensidad de Pudrición de Cogollo (intensidad_pc_x100) en los predios evaluados. (Vista 1)

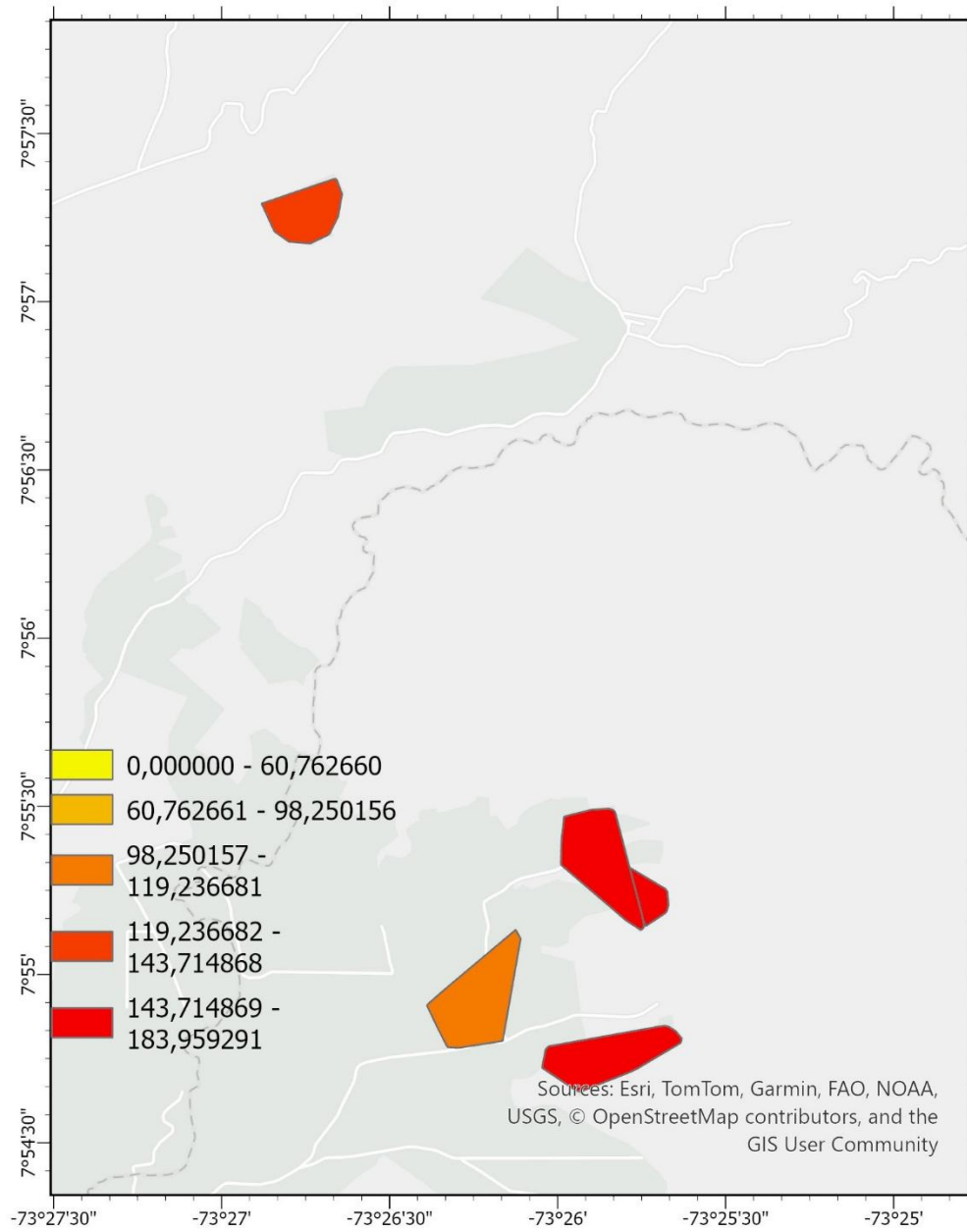


Figura 16.

Distribución espacial de la intensidad de Pudrición de Cogollo (intensidad_pc_x100) en los predios evaluado (Vista 2)

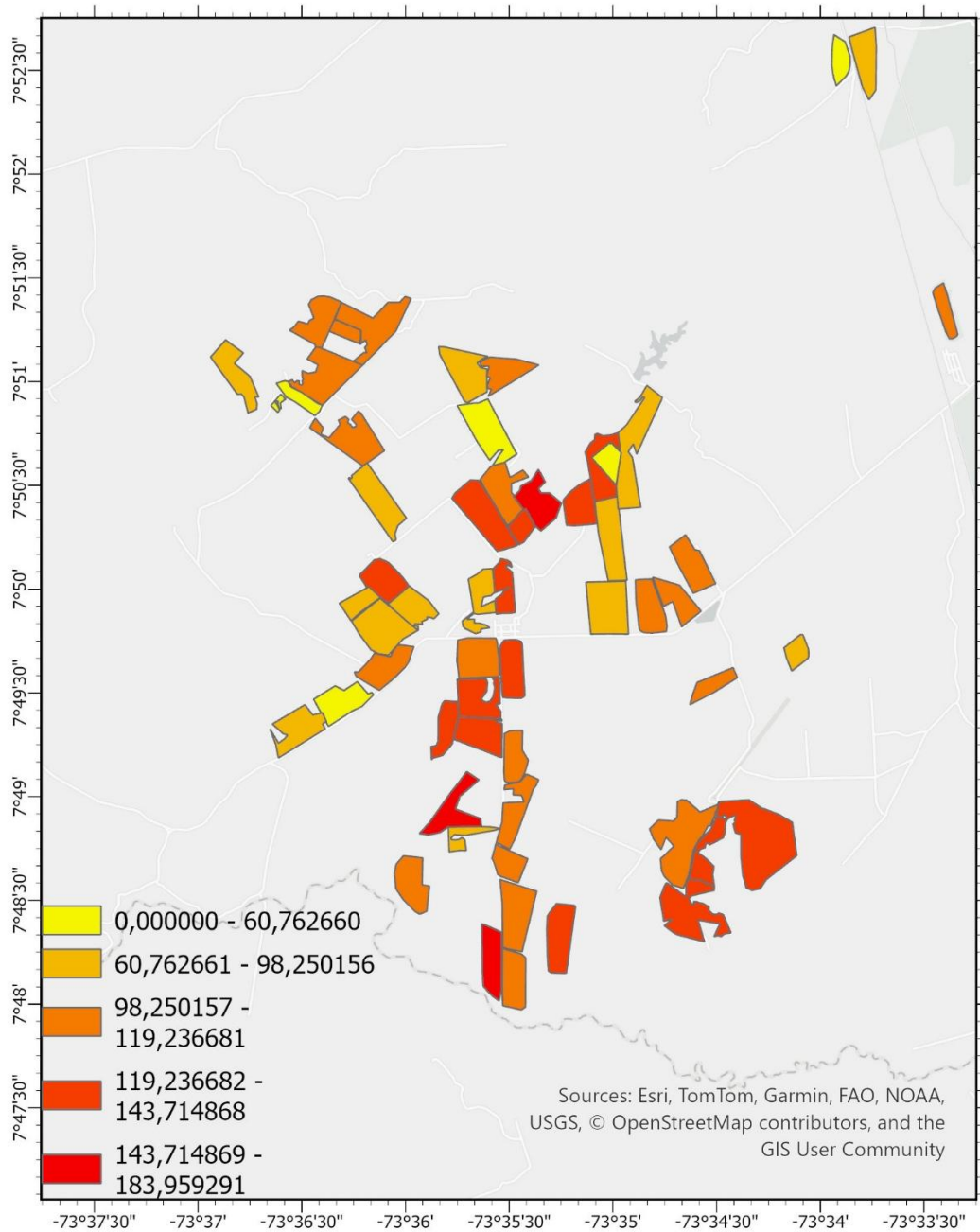


Figura 17.

Distribución espacial de la intensidad de Pudrición de Cogollo (intensidad_pc_x100) en los predios evaluado (Vista 3)



Figura 18.

Distribución espacial de la intensidad de Pudrición de Cogollo (intensidad_pc_x100) en los predios evaluados (Vista 4)

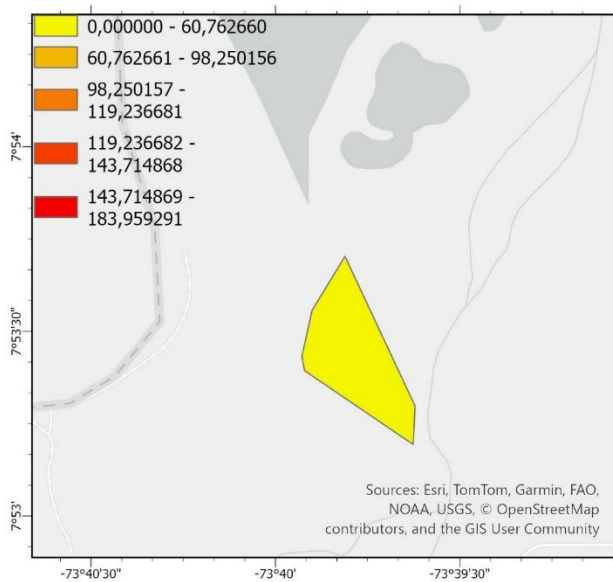
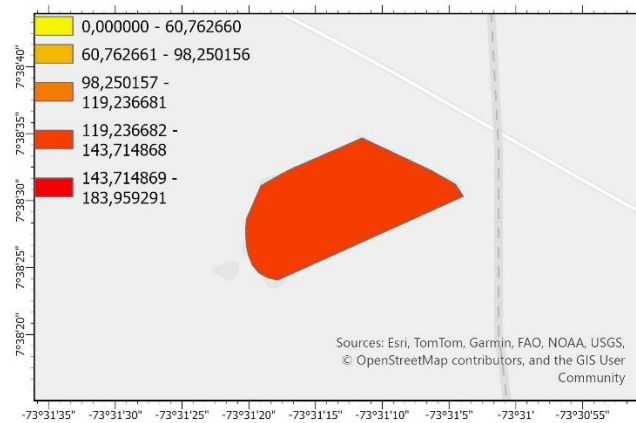


Figura 19.

Distribución espacial de la intensidad de Pudrición de Cogollo (intensidad_pc_x100) en los predios evaluados (Vista 5)



11.8.2 Tendencia temporal de las enfermedades en el cultivo de palma

Tabla 13.

Tendencia temporal de Pudrición de Cogollo

Mes	Eventos PC	Palmas observadas	Tasa Pc x 1000 Palmas
Enero	17169	14827	1157,955082
Febrero	13360	13088	1020,782396
Marzo	17787	15191	1170,890659
Abril	14952	12469	1199,133852
Mayo	12074	10624	1136,483434
Junio	14179	12943	1095,495635
Julio	15918	13511	1178,151136
Agosto	10409	10383	1002,504093
Septiembre	12390	12595	983,7237
Octubre	15931	13631	1168,733035
Noviembre	21762	16272	1337,389381
Diciembre	12562	12419	1011,514615

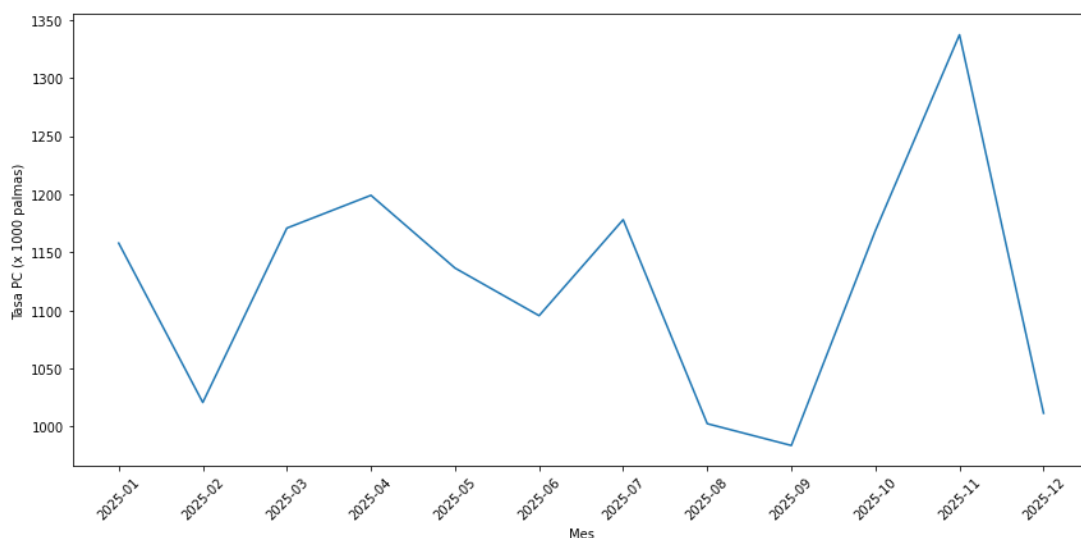
La Tabla 13 presenta la tendencia mensual de la Pudrición de Cogollo, expresada mediante el número de eventos registrados (*eventos_pc*), el número de palmas observadas por mes (*palmas_observadas*) y la tasa de eventos de PC por cada 1.000 palmas observadas (*tasa_pc_x_1000_palmas*).

Esta tasa se calcula como la razón entre el total de registros de PC en el mes y el número de palmas únicas observadas en dicho periodo, multiplicada por 1.000. En consecuencia, el indicador cuantifica la intensidad de ocurrencia de eventos de PC, más que la proporción de palmas afectadas.

Los resultados muestran que la tasa mensual de PC se mantiene elevada y relativamente estable a lo largo del año, con valores que oscilan aproximadamente entre 980 y 1.340 eventos por cada 1.000 palmas observadas. Esta magnitud indica que, en promedio, cada palma observada genera alrededor de uno o más registros de PC por mes, lo que refleja un seguimiento recurrente sobre un conjunto de palmas persistentemente afectadas.

Figura 20.

Tendencia temporal de pudrición de cogollo



Se observan fluctuaciones mensuales, con incrementos notorios en los meses de marzo, abril, julio y especialmente noviembre, donde se alcanza el valor máximo del periodo (1.337 eventos por 1.000 palmas). En contraste, los valores más bajos se registran en agosto, septiembre y diciembre con tasas cercanas a 1.000 eventos por 1.000 palmas observadas.

11.8.3 Análisis de casos anteriores y nuevos de pc

Tabla 14.

Relaciones de caos nuevos y reincidentes

Mes	Caso anterior	Caso nuevo	Total
Abril	14817	135	14952
Agosto	10267	142	10409
Diciembre	12370	192	12562
Enero	16977	192	17169
Febrero	13184	176	13360
Julio	15791	127	15918
Junio	14071	108	14179
Marzo	17584	203	17787
Mayo	11965	109	12074
Noviembre	21386	376	21762
Octubre	15741	190	15931
Septiembre	12158	232	12390

El análisis mensual de la variable caso evidencia un predominio sistemático de casos ANTERIORES frente a NUEVOS, lo que indica un comportamiento persistente de la Pudrición de Cogollo (PC) y una alta carga de eventos asociados a seguimiento/reincidencia. El mayor pico ocurre en noviembre (21.762 casos), explicado principalmente por casos ANTERIORES (21.386), aunque también concentra el mayor número absoluto de casos NUEVOS (376). En términos relativos, los casos NUEVOS representan una proporción baja del total ($\approx 0,9\% - 1,7\%$), con el

máximo en noviembre ($\approx 1,7\%$), lo que sugiere que los aumentos mensuales se deben más a persistencia y acumulación de casos que a la aparición masiva de nuevos eventos.

11.8.2.1 Análisis de predios visitados durante todo el año. Para la revisión espacial se empleó un muestreo no probabilístico de tipo intencional, seleccionando únicamente predios con cobertura completa durante los doce meses del año, con el fin de asegurar comparabilidad temporal y reducir sesgos de observación.

Se seleccionó un subgrupo de predios con cobertura temporal completa, correspondiente a nueve (9) predios que fueron evaluados de manera continua durante los doce meses del año. Esta selección se realizó con el propósito de garantizar homogeneidad temporal en la información, reducir sesgos derivados del subregistro mensual y asegurar la comparabilidad espacial entre unidades de análisis.

Tabla 15.

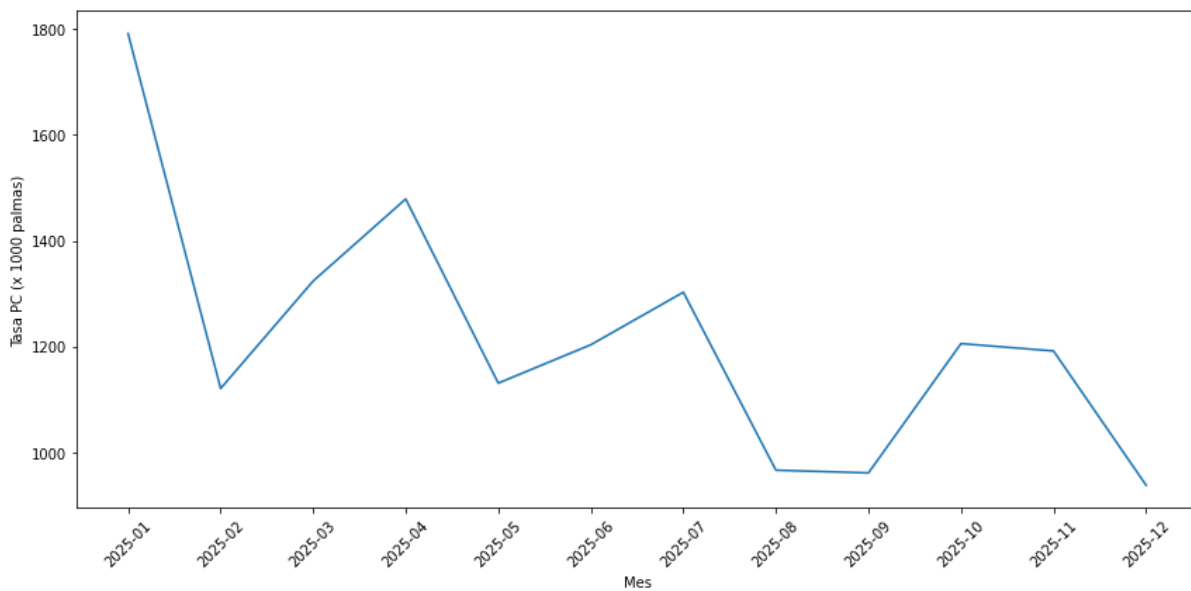
Tendencia mensual

Mes	Eventos pc	Palmas Observadas	Tasa pc x 1000 palmas
2025-01	4624	2581	1791,554
2025-02	2926	2611	1120,643
2025-03	3013	2276	1323,814
2025-04	3437	2324	1478,916
2025-05	2680	2370	1130,802
2025-06	2521	2095	1203,341
2025-07	2772	2128	1302,632
2025-08	2091	2164	966,266
2025-09	2198	2287	961,084
2025-10	2745	2277	1205,534
2025-11	2755	2312	1191,609
2025-12	1828	1949	937,917

En los predios con seguimiento completo, la tasa de eventos de PC por 1.000 palmas observadas se mantuvo elevada durante todo 2025, con un máximo en enero y valores mínimos en agosto–septiembre y diciembre. Dado que el numerador corresponde a registros (eventos) y el denominador a palmas únicas, la tasa refleja principalmente la intensidad de registro y seguimiento sanitario, pudiendo incrementarse en meses con mayor repetición de registros por palma.

Figura 21.

Tendencia mensual de la tasa de eventos de Pudrición de Cogollo por 1.000 palmas observadas (predios con cobertura completa)



La figura muestra la evolución mensual de la tasa de eventos de Pudrición de Cogollo (PC) por cada 1.000 palmas observadas en un subconjunto de predios que fueron monitoreados de forma continua durante los doce meses del año. Este indicador refleja la intensidad de registro de la enfermedad, dado que el numerador corresponde al número de eventos registrados y el denominador al número de palmas únicas observadas en cada mes.

11.9 Análisis espacial detallado de tres predios prioritarios para comportamiento de la enfermedad

Para la cartografía mensual se seleccionó como variable cuantitativa principal intensidad_{pc_x100}, definida como el número de eventos de Pudrición de Cogollo (PC) por cada 100 palmas observadas en el predio y mes. Esta elección permite estandarizar por el esfuerzo de muestreo y hacer comparables predios/meses aun cuando la cobertura de monitoreo es irregular (no todos los predios se visitan cada mes) y la captura está sesgada hacia palmas con afectación. En paralelo, se codificó visualmente la grados_{severidad} para representar la dimensión de gravedad del evento, complementando la intensidad (frecuencia relativa) con el nivel de daño registrado. De esta forma, el mapa integra tanto la presión sanitaria como la criticidad clínica, lo cual mejora la priorización de acciones de monitoreo y control.

Con el fin de profundizar en la dinámica espacial de la Pudrición de Cogollo (PC) a escala predial, se desarrolla un análisis específico en dos predios seleccionados. Este capítulo complementa los resultados globales (tendencia temporal, prevalencia e intensidad de eventos) mediante una revisión cartográfica de alta resolución que permite: (i) identificar patrones de agrupamiento interno, (ii) localizar focos recurrentes o zonas de mayor riesgo dentro del predio, y (iii) orientar la priorización del monitoreo y acciones de control fitosanitario.

Para evaluar el comportamiento mensual de la Pudrición de Cogollo (PC) se construyó una serie temporal por predio, empleando como indicador principal la intensidad_{pc_x100}, definida como el número de eventos de PC por cada 100 palmas observadas. Este indicador permite comparar meses con distinta cobertura de monitoreo al estandarizar por el esfuerzo de observación. Los meses pico se identificaron como aquellos con valores atípicos del indicador (por encima del

percentil 90 / media + 2 desviaciones), y se contrastaron con meses no pico mediante métricas complementarias: (i) intensidad_x100 (proporción de palmas observadas con PC) y (ii) la recurrencia medida como eventos por palma con PC ($\text{eventos_pc} / \text{palmas_pc_unicas}$). Finalmente, los meses pico se representaron espacialmente con mapas de puntos coloreados por grados_severidad , permitiendo verificar si los incrementos temporales correspondieron a focos localizados o a una distribución generalizada dentro del predio.

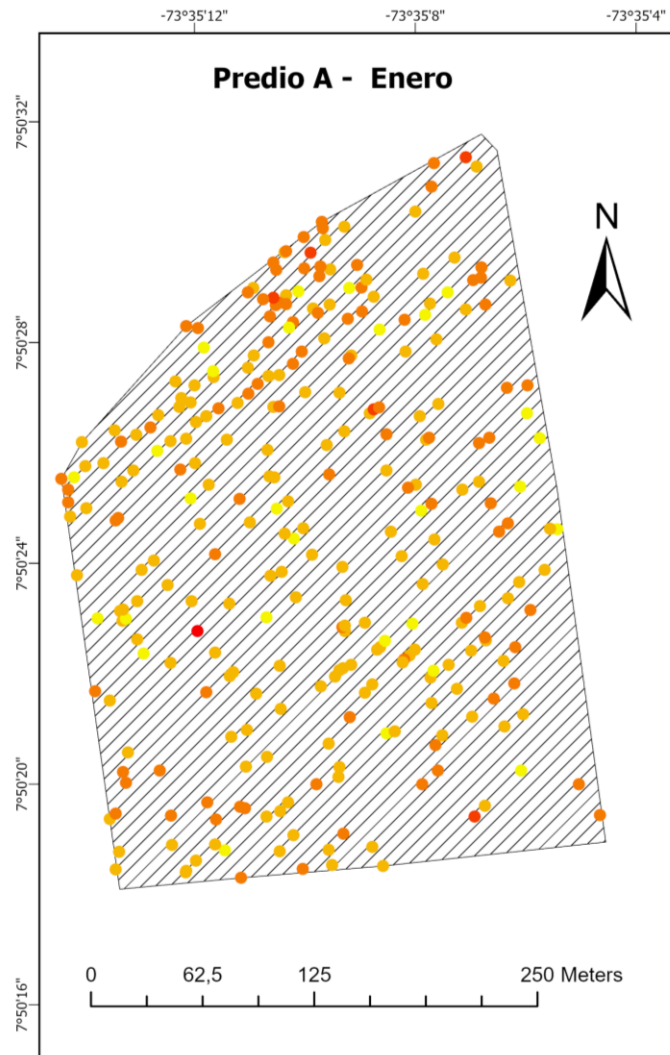
Tabla 16.

Estimación predio A, hectareaje 9, palmas sembradas estimadas 1503

Mes	Palmas observadas	Eventos PC	Palmas PC únicas	Tasa x 1000	Intensidad x100	Intensidad pc x100
Enero	279	291	261	173,652695	93,548387	104,301075
Febrero	279	291	261	173,652695	93,548387	104,301075
Marzo	281	294	264	175,648703	93,950178	104,626335
Abril	281	294	264	175,648703	93,950178	104,626335
Mayo	283	297	266	176,979375	93,992933	104,946996
Junio	285	298	267	177,644711	93,684211	104,561404
Julio	287	601	269	178,975383	93,728223	209,407666
Agosto	288	303	270	179,640719	93,75	105,208333
Septiembre	289	303	270	179,640719	93,425606	104,844291
Octubre	290	305	270	179,640719	93,103448	105,172414
Noviembre	290	614	273	181,636727	94,137931	211,724138
Diciembre	292	308	273	181,636727	93,493151	105,479452

Figura 22.

Estimación predio A (Enero), hectareaje 9, palmas sembradas estimadas 1503



La correlación entre la información sanitaria y el polígono del predio para los meses de enero y diciembre se realizó mediante la superposición espacial de los registros puntuales de palmas afectadas con el polígono delimitador del predio. De esta forma, las métricas agregadas (en particular la *intensidad_pc_x100*, definida como eventos de PC por cada 100 palmas observadas) se interpretan exclusivamente sobre las palmas contenidas dentro del área efectiva del

predio. El patrón espacial observado —alta densidad de puntos y predominio de severidades medias y altas— es consistente con el valor elevado de intensidad registrado para los dos meses, lo que sugiere recurrencia de eventos y seguimiento repetido de palmas afectadas, más que la aparición aislada de nuevos casos.

Se observa muy pocos cambios en el periodo de doce meses lo cual confirma la hipótesis que la enfermedad es estática, no hay nuevos casos y no avanza ni disminuye.

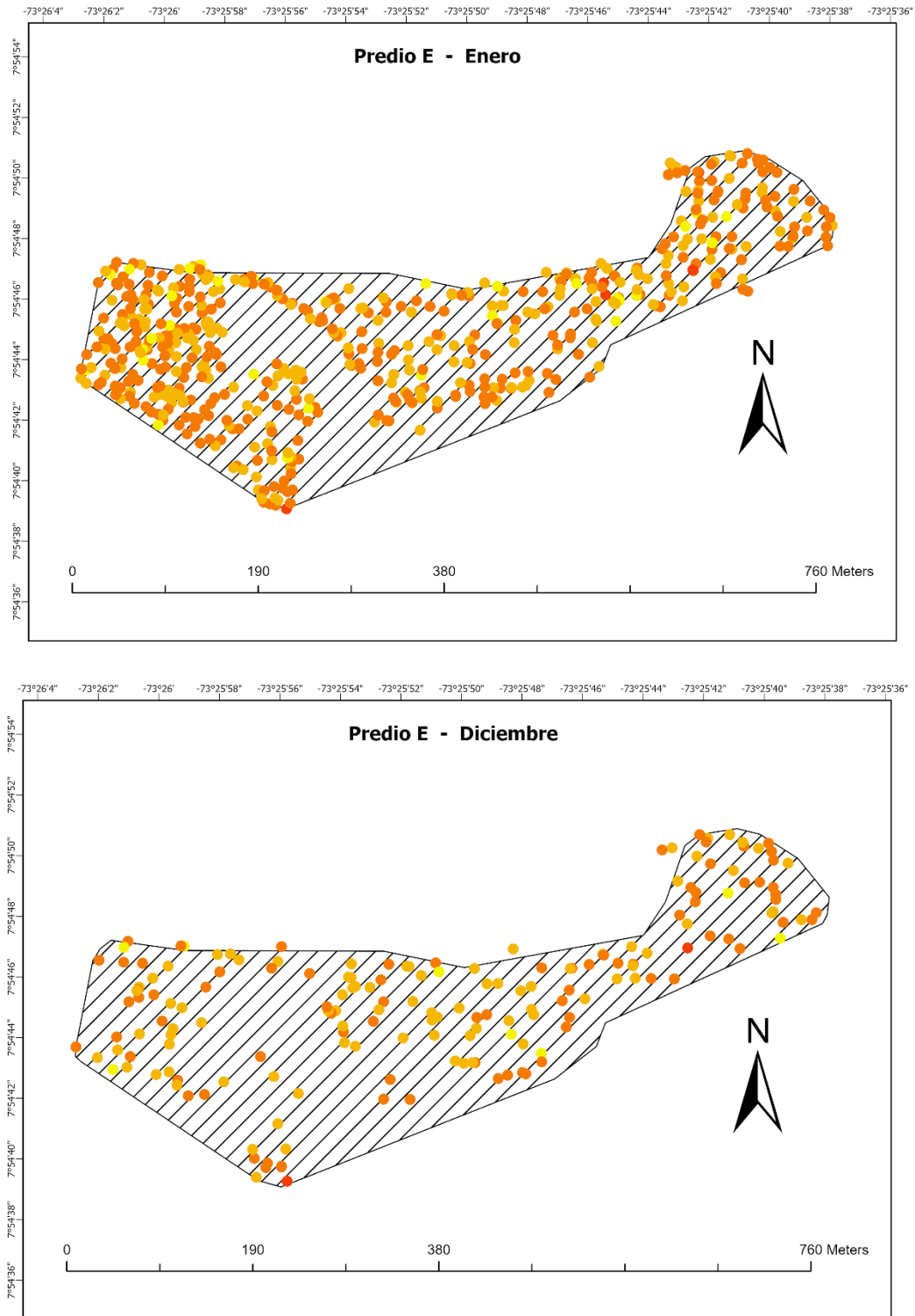
Tabla 17.

Estimación predio E, hectareaje 10, palmas sembradas estimadas 1670

MES	Palmas observadas	Eventos PC	Palmas PC únicas	Tasa x1000	Intensidad x100	Intensidad pc x100
Enero	497	1181	485	290,419162	97,585513	237,625755
Febrero	517	623	505	302,39521	97,678917	120,502901
Marzo	329	361	326	195,209581	99,088146	109,726444
Abril	334	728	329	197,005988	98,502994	217,964072
Mayo	337	368	331	198,203593	98,219585	109,198813
Junio	297	627	290	173,652695	97,643098	211,111111
Julio	297	315	290	173,652695	97,643098	106,060606
Agosto	302	320	294	176,047904	97,350993	105,960265
Septiembre	321	340	311	186,227545	96,884735	105,919003
Octubre	323	689	313	187,42515	96,904025	213,312693
Noviembre	335	356	323	193,413174	96,41791	106,268657
Diciembre	186	187	176	105,389222	94,623656	100,537634

Figura 23.

Estimación predio E, hectareaje 10, palmas sembradas estimadas 1670



En el Predio E se observa una alta persistencia de la Pudrición de Cogollo durante todo el año, evidenciada por una intensidad_x100 entre 94,6% y 99,1%, lo que indica que casi todas las palmas observadas registran PC. Sin embargo, la dinámica mensual presenta picos marcados en enero (237,6), abril (218,0), junio (211,1) y octubre (213,3) en la intensidad_pc_x100, reflejando un incremento en la carga de eventos por palma observada. Al comparar eventos respecto a palmas únicas con PC, los meses pico presentan aproximadamente 2,1 a 2,4 eventos por palma, mientras que en meses estables (julio–diciembre) esta relación se aproxima a 1,0–1,1. Por tanto, los picos mensuales se explican principalmente por recurrencia/seguimiento de palmas ya afectadas más que por una expansión por nuevos casos.

La Pudrición de Cogollo (PC) presenta un comportamiento epidemiológico caracterizado por su persistencia temporal y una expansión espacial lenta. Diversos estudios técnicos reportan que las palmas afectadas pueden tardar entre 6 y 12 meses en recuperarse en estados leves e intermedios, mientras que en estados severos la enfermedad conduce a la pérdida de la palma tras un proceso prolongado. En consecuencia, la dinámica temporal de la PC se manifiesta principalmente a través de una alta recurrencia de eventos en las mismas palmas y una baja proporción de casos nuevos, patrón que coincide con los resultados de este estudio, donde más del 98% de los registros corresponden a casos ANTERIORES y los picos mensuales se explican por incremento en eventos de seguimiento más que por la aparición de nuevos focos.

11.10 Análisis de autocorrelación espacial mediante el Índice de Moran

11.10.1 Justificación del análisis espacial

La Pudrición de Cogollo (PC) en palma de aceite presenta un comportamiento espacial complejo, determinado no solo por la biología de la enfermedad, sino también por factores ambientales, edáficos y de manejo agronómico. En este contexto, la comparación aislada de indicadores sanitarios entre predios resulta insuficiente para identificar patrones espaciales relevantes, ya que no permite establecer si los valores observados se distribuyen de forma aleatoria o si existen agrupamientos espaciales que evidencien focos persistentes de riesgo.

El análisis de autocorrelación espacial permite evaluar si predios geográficamente cercanos tienden a presentar niveles similares de intensidad de la enfermedad, lo cual constituye un insumo clave para orientar estrategias de monitoreo, control fitosanitario y asignación eficiente de recursos. Por esta razón, en el presente estudio se incorpora el Índice global de Moran (Moran's I) como herramienta para evaluar la estructura espacial de la intensidad de la PC a lo largo del tiempo.

11.10.2 Consideraciones espaciales del sistema de predios

Los predios analizados no conforman una superficie continua, sino un conjunto de unidades espaciales discretas, con tamaños, formas y grados de aislamiento heterogéneos. Esta configuración espacial introduce dos implicaciones metodológicas fundamentales:

1. La vecindad espacial no es uniforme, dado que algunos predios se encuentran relativamente aislados.

2. El contacto físico directo entre predios no siempre existe, por lo que las relaciones espaciales deben definirse explícitamente mediante una matriz de pesos espaciales.

En consecuencia, el análisis de autocorrelación espacial no busca modelar un proceso de propagación directa entre predios colindantes, sino evaluar si la intensidad relativa de la enfermedad presenta una estructura espacial, asociada a condiciones ambientales compartidas, similitudes regionales o prácticas de manejo comparables.

11.10.3 Elección del Índice de Moran

El Índice de Moran es una de las medidas más ampliamente utilizadas para cuantificar la autocorrelación espacial de variables continuas. En este estudio se emplea para evaluar la variable intensidad_pc_x100, definida como el número de eventos de PC por cada 100 palmas observadas, dado que este indicador:

- Estandariza por el esfuerzo de muestreo,
- Captura la recurrencia y la carga operativa de eventos,
- Permite comparaciones consistentes entre predios y entre meses.

El Índice de Moran permite contrastar la hipótesis nula de aleatoriedad espacial frente a la alternativa de agrupamiento o dispersión, proporcionando una medida global del patrón espacial de la enfermedad en cada periodo analizado.

11.10.4 Definición de la matriz de pesos espaciales

Dada la naturaleza discontinua del sistema de predios, la definición de la vecindad espacial constituye un elemento central del análisis. En lugar de asumir esquemas de contigüidad estricta (Queen o Rook), se optó por una matriz de pesos espaciales basada en k vecinos más cercanos (KNN).

Este enfoque presenta varias ventajas:

- (i) garantiza que todos los predios tengan al menos un vecino, evitando unidades aisladas;
- (ii) permite modelar la proximidad relativa incluso cuando no existe frontera compartida;
- (iii) resulta consistente con sistemas espaciales fragmentados, como el analizado en este estudio.

La matriz de pesos se estandariza por filas, de modo que cada predio contribuya proporcionalmente al cálculo del índice, independientemente del número de vecinos asignados.

11.10.5 Enfoque espacio-temporal del análisis

El análisis de autocorrelación espacial se realiza de forma mensual, calculando un Índice de Moran independiente para cada periodo, utilizando como variable de interés la intensidad $_{pc_x100}$ correspondiente a cada predio.

Este enfoque permite:

- Identificar meses con agrupamiento espacial estadísticamente significativo,
- Contrastar meses con picos de intensidad frente a meses con comportamiento estable,

- Evaluar si los incrementos temporales observados se acompañan de una estructura espacial definida o responden a procesos internos de cada predio.

11.10.6 Alcance e interpretación de los resultados

Un valor significativo del Índice de Moran no implica necesariamente transmisión directa de la enfermedad entre predios, sino la existencia de similitud espacial en los niveles de intensidad observados. Dicha similitud puede estar asociada a condiciones ambientales compartidas, prácticas de manejo similares, características edafoclimáticas regionales o una historia sanitaria común.

En consecuencia, el Índice de Moran se interpreta en este estudio como una herramienta para la detección de patrones espaciales de riesgo, y no como una prueba de causalidad epidemiológica directa.

11.10.7 Relevancia para la gestión fitosanitaria

La incorporación del análisis de autocorrelación espacial permite priorizar predios y periodos con riesgo agregado, facilitando la toma de decisiones en materia de monitoreo, control y asignación de recursos. La identificación de agrupamientos espaciales persistentes constituye un insumo clave para el diseño de estrategias de intervención focalizadas y sostenibles.

11.11 Resultados del análisis de autocorrelación espacial

11.11.1 Índice global de Moran

En esta sección se presentan los resultados del Índice global de Moran calculado mensualmente para la variable intensidad_{pc}_x100. El objetivo es determinar si la distribución espacial de la intensidad de la Pudrición de Cogollo difiere de un patrón aleatorio y si existen evidencias de agrupamiento o dispersión espacial en los distintos meses analizados.

Tabla 18.

Resumen de los valores índice junto con los niveles de significancia estadística obtenidos mediante permutaciones aleatorias

Mes	No predios	Moran_I	p_sim
Enero	57	0,285724	0,001
Febrero	50	0,332139	0,001
Marzo	60	0,043878	0,61
Abril	51	0,318638	0,001
Mayo	39	0,297323	0,001
Junio	53	0,339494	0,001
Julio	55	0,226812	0,005
Agosto	43	0,191123	0,028
Septiembre	52	0,147419	0,084
Octubre	56	-0,039875	0,647
Noviembre	64	0,225637	0,009
Diciembre	54	0,245432	0,006

En términos generales, los resultados evidencian que la intensidad de la PC presenta, en la mayoría de meses, un patrón de autocorrelación espacial positiva, indicando que predios cercanos tienden a mostrar valores similares de intensidad.

Se identifican meses con autocorrelación espacial positiva y estadísticamente significativa ($p_{sim} < 0,05$): enero, febrero, abril, mayo, junio, julio, agosto, noviembre y diciembre, con valores de Moran's I entre 0,191 y 0,339. Los mayores niveles de autocorrelación se observan en junio ($I = 0,339$) y febrero ($I = 0,332$), lo que sugiere una estructura espacial particularmente marcada en estos periodos.

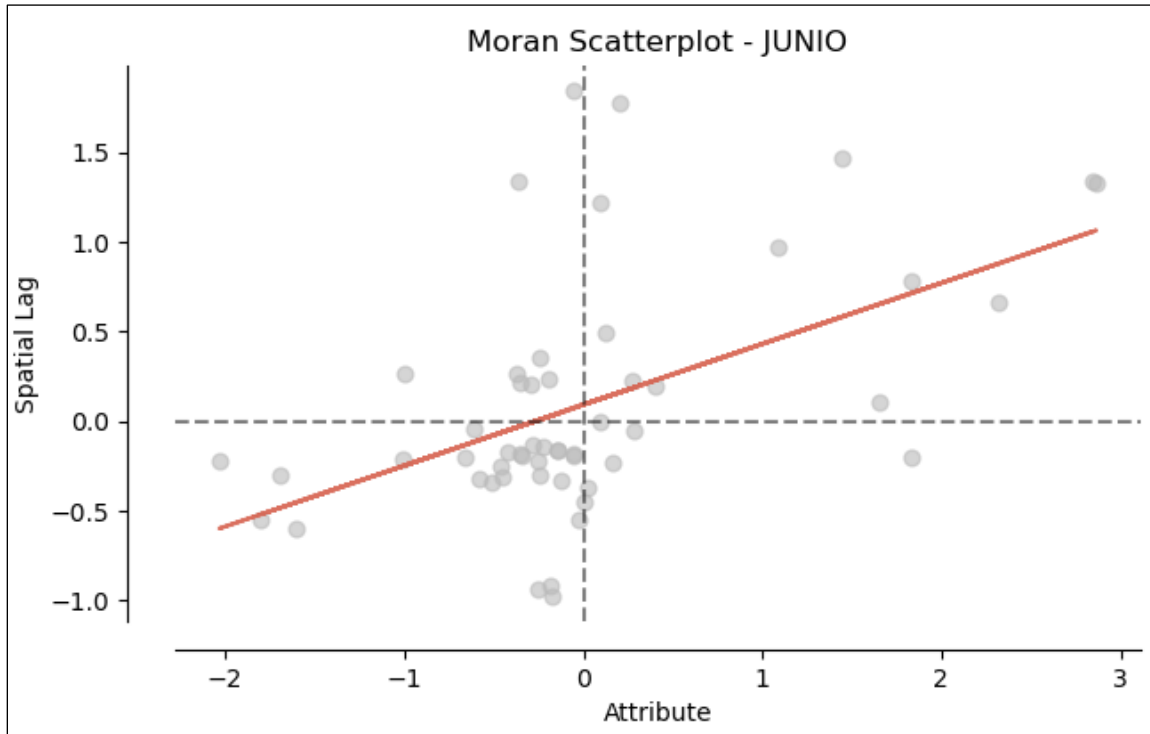
Por el contrario, marzo y octubre no presentan evidencia estadística de autocorrelación espacial, mostrando valores compatibles con un patrón aleatorio. Septiembre exhibe autocorrelación positiva moderada, pero sin alcanzar significancia al nivel del 5%.

En conjunto, estos resultados respaldan la pertinencia de complementar el análisis global con indicadores locales (LISA), orientados a identificar la localización específica de los conglomerados espaciales.

Con el fin de complementar la exploración espacial de la intensidad de Pudrición de Cogollo, se construyó el Moran Scatterplot para el mes de junio, el cual presenta uno de los mayores valores del índice global de Moran. Este gráfico muestra la relación entre los valores estandarizados de la variable y su rezago espacial, permitiendo identificar visualmente agrupamientos de predios con intensidades similares y apoyar la interpretación del patrón de autocorrelación espacial positiva.

Figura 24.

Moran Scatterplot de la intensidad de Pudrición de Cogollo en los predios evaluados – junio de 2025.



El Moran Scatterplot permite visualizar la relación entre los valores estandarizados de la intensidad de Pudrición de Cogollo en cada predio y el rezago espacial de dicha variable, es decir, el promedio ponderado de los valores observados en los predios vecinos. Cada punto del gráfico representa un predio, mientras que las líneas punteadas delimitan los cuadrantes que permiten identificar diferentes tipos de asociación espacial.

La pendiente positiva de la línea de regresión corresponde al valor del índice global de Moran ($I = 0,339$), lo cual indica la presencia de autocorrelación espacial positiva para el mes de junio. Esto sugiere que predios con valores altos de intensidad tienden a localizarse cerca de otros predios con valores igualmente altos, mientras que predios con valores bajos tienden a agruparse

con predios de baja intensidad. En consecuencia, la distribución espacial de la enfermedad no es aleatoria, sino que presenta patrones de agrupamiento espacial.

11.12 Indicadores locales de asociación espacial (LISA)

Con el fin de profundizar en la interpretación del patrón espacial, se estimaron indicadores locales de asociación espacial (LISA) para la variable intensidad_pc_x100 con periodicidad mensual. Este análisis permite clasificar cada predio en función de su relación con el entorno espacial, distinguiendo clústeres Alto–Alto (HH), Bajo–Bajo (LL), valores atípicos Alto–Bajo (HL) y Bajo–Alto (LH), así como predios no significativos.

Tabla 19.

Distribución mensual de los clústeres LISA por tipo de asociación espacial

Cluster Lisa	Mes	Alto–Alto	Alto–Bajo	Bajo–Alto	Bajo–Bajo	No significativo
0	Abril	5.0	0.0	2.0	0.0	44.0
1	Agosto	3.0	0.0	2.0	0.0	38.0
2	Diciembre	3.0	2.0	2.0	0.0	47.0
3	Enero	4.0	0.0	2.0	4.0	47.0
4	Febrero	5.0	0.0	0.0	3.0	42.0
5	Julio	1.0	0.0	1.0	4.0	49.0
6	Junio	5.0	0.0	2.0	1.0	45.0
7	Marzo	1.0	0.0	4.0	0.0	55.0
8	Mayo	4.0	0.0	3.0	0.0	32.0
9	Noviembre	4.0	0.0	4.0	0.0	56.0
10	Octubre	0.0	1.0	0.0	1.0	54.0
11	Septiembre	1.0	2.0	2.0	0.0	47.0

La Tabla 19 presenta la distribución mensual de los clústeres LISA según el tipo de asociación espacial identificado en los predios evaluados.

En general, la mayoría de predios se clasifica como no significativa, lo cual es esperable en análisis locales. No obstante, la presencia recurrente de clústeres Alto–Alto (HH) en la mayoría de meses evidencia la existencia de hotspots persistentes, particularmente en febrero, abril y junio, coherentes con los meses de mayor autocorrelación global.

Los clústeres Bajo–Bajo (LL) se presentan con menor frecuencia y reflejan áreas localizadas de baja intensidad sostenida. Los valores atípicos espaciales (HL y LH) aparecen de manera puntual y sugieren predios con comportamientos diferenciales, potencialmente asociados a particularidades de manejo o condiciones internas específicas.

En octubre, mes sin autocorrelación global significativa, el análisis LISA muestra una presencia mínima de clústeres, confirmando un patrón espacial compatible con aleatoriedad.

11.13 Indicadores locales de asociación espacial (LISA)

El mapa LISA permite identificar agrupamientos espaciales locales de la intensidad de Pudrición de Cogollo entre predios vecinos. Los clústeres tipo Alto–Alto representan zonas donde predios con alta intensidad de la enfermedad se encuentran rodeados por predios con valores igualmente altos, lo cual sugiere posibles focos espaciales de la enfermedad. Por el contrario, los clústeres Bajo–Bajo corresponden a áreas donde la intensidad de la enfermedad es consistentemente baja entre predios vecinos.

Debido a la escala del mapa, se crearon 4 vistas independientes para una mejor visualización.

Figura 25.

Clústeres espaciales de la intensidad de Pudrición de Cogollo identificados mediante el análisis de Indicadores Locales de Asociación Espacial (LISA). (Vista General)

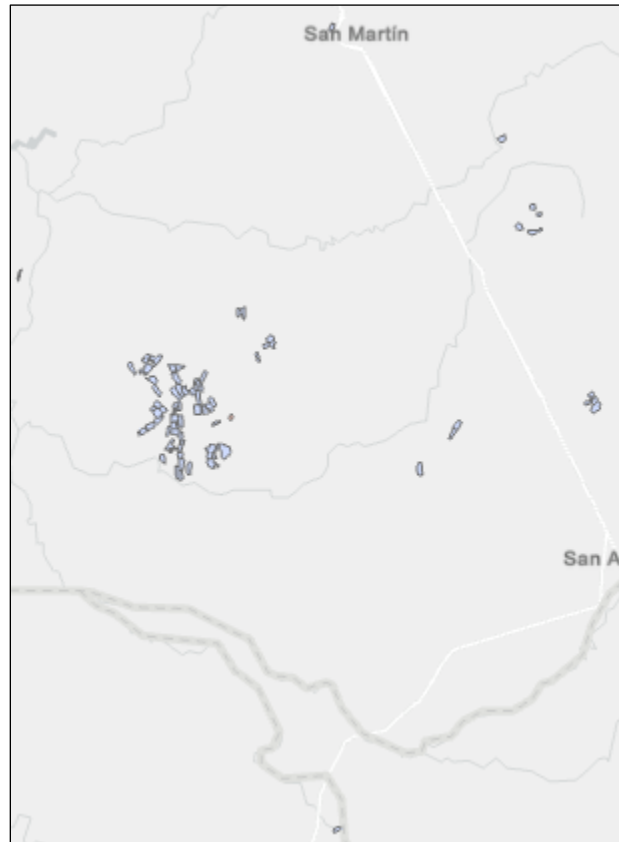


Figura 26.

Clústeres espaciales de la intensidad de Pudrición de Cogollo identificados mediante el análisis de Indicadores Locales de Asociación Espacial (LISA). (Vista 1)

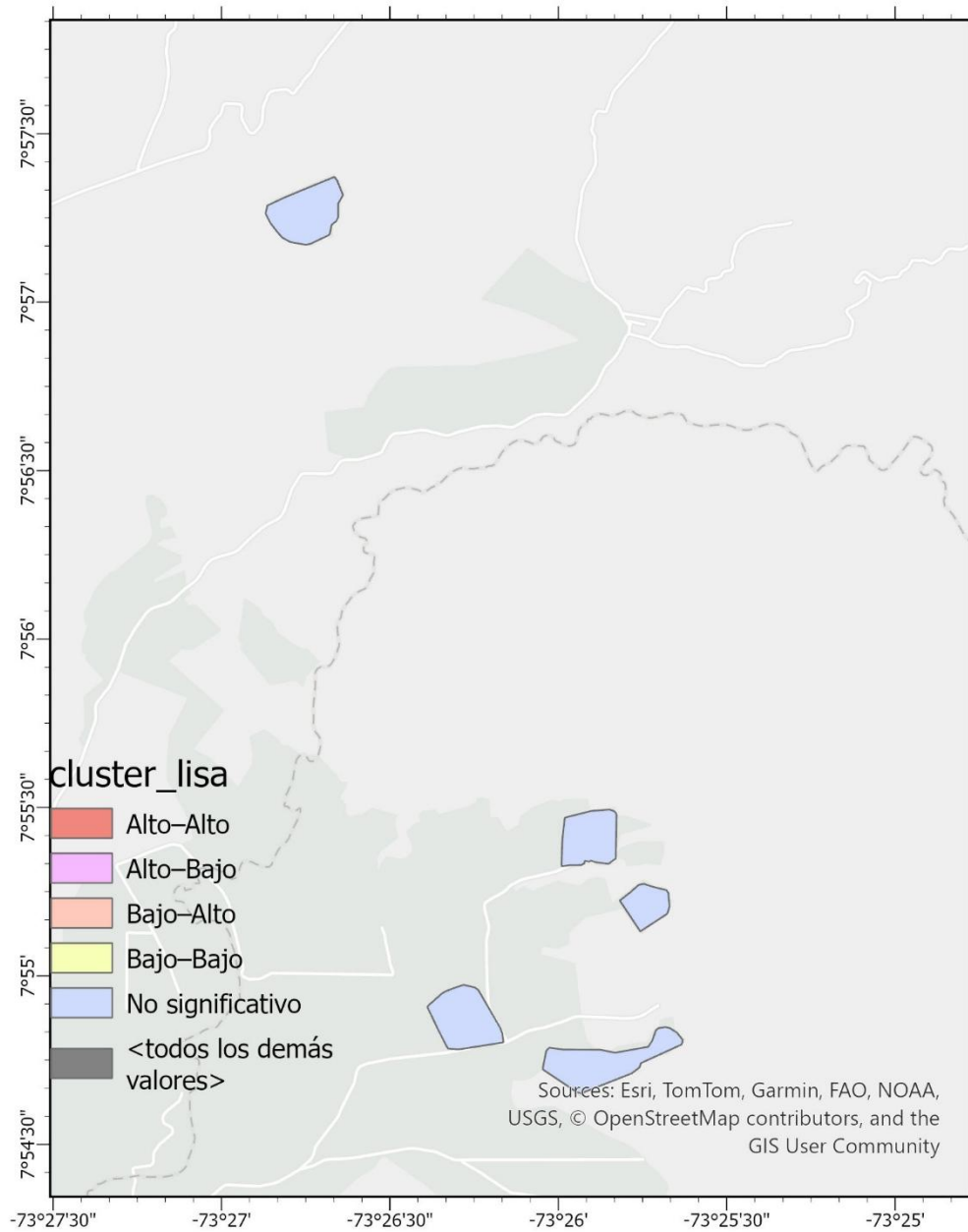


Figura 27.

Clústeres espaciales de la intensidad de Pudrición de Cogollo identificados mediante el análisis de Indicadores Locales de Asociación Espacial (LISA). (Vista 2)

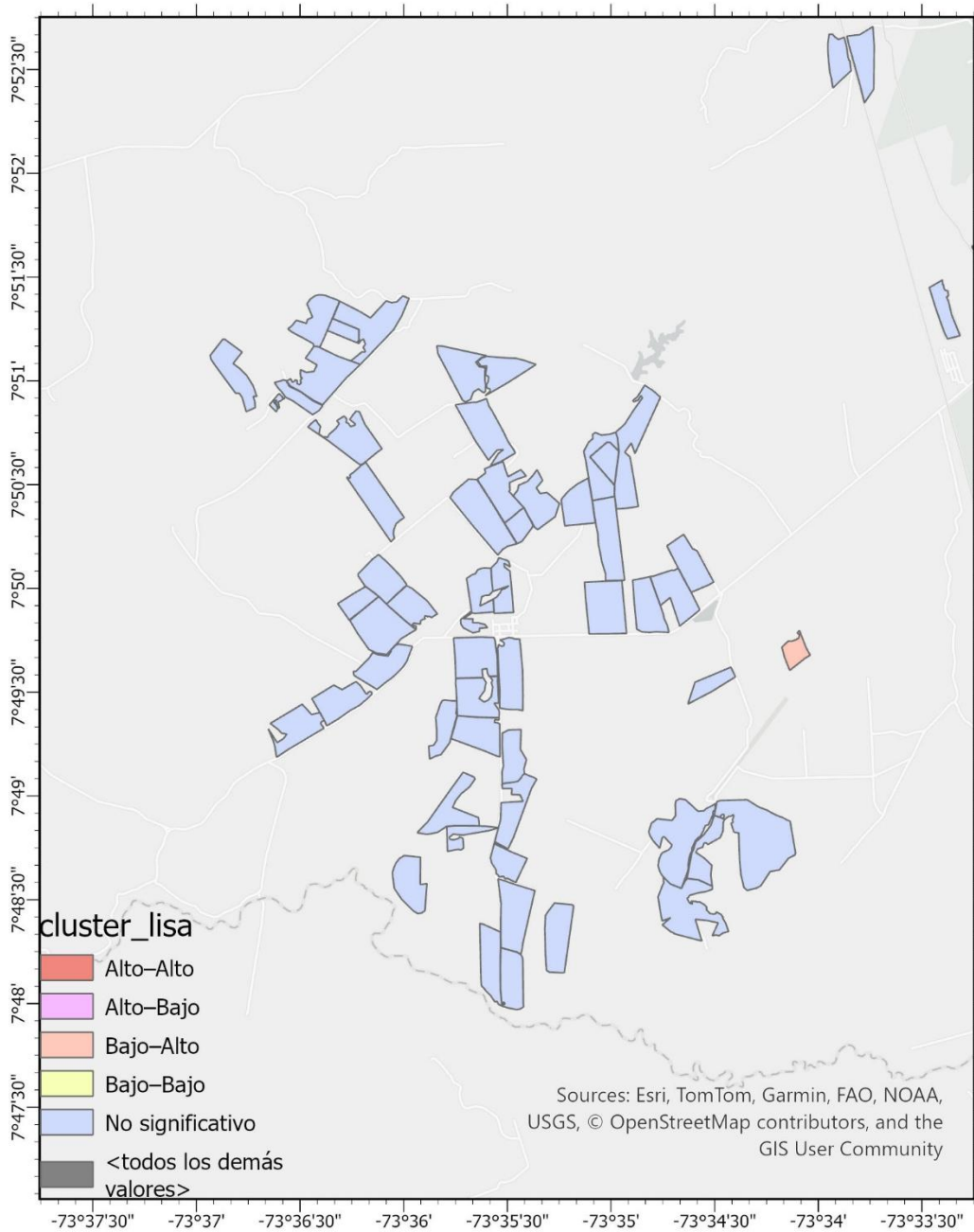


Figura 28.

Clústeres espaciales de la intensidad de Pudrición de Cogollo identificados mediante el análisis de Indicadores Locales de Asociación Espacial (LISA). (Vista 3)

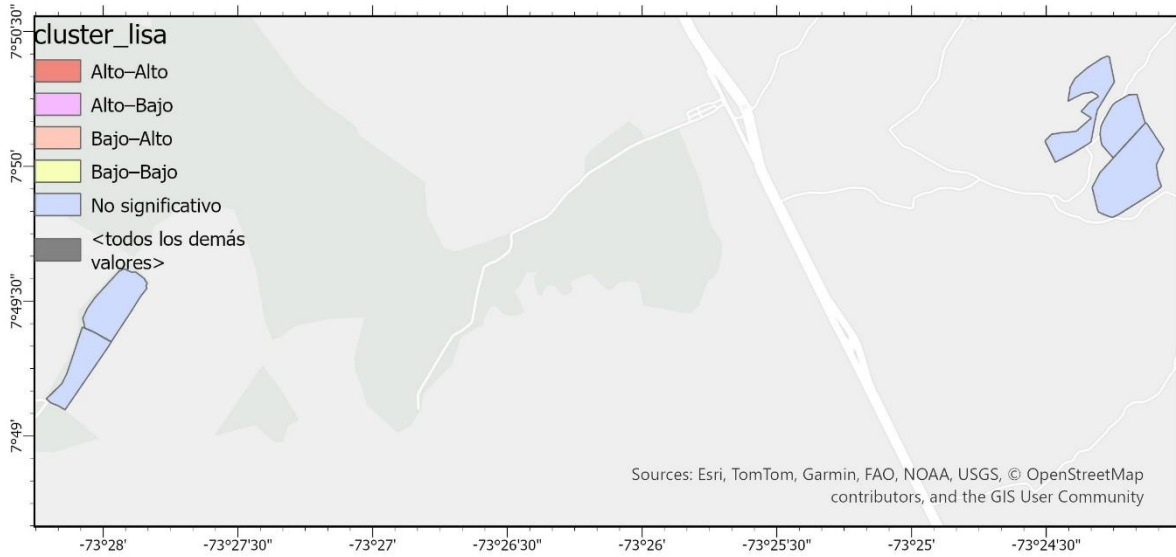


Figura 29.

Clústeres espaciales de la intensidad de Pudrición de Cogollo identificados mediante el análisis de Indicadores Locales de Asociación Espacial (LISA). (Vista 4)

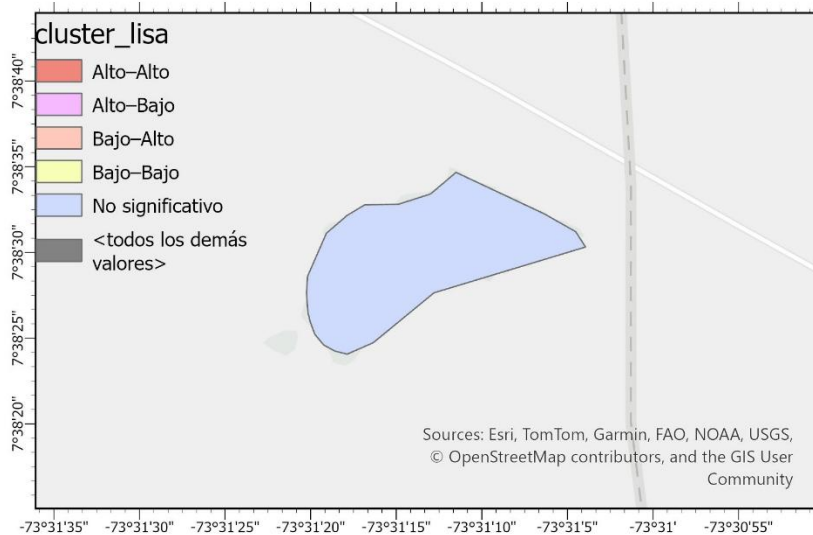
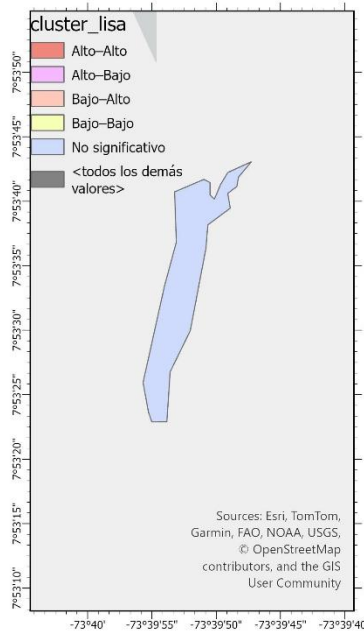


Figura 30.

Clústeres espaciales de la intensidad de Pudrición de Cogollo identificados mediante el análisis de Indicadores Locales de Asociación Espacial (LISA). (Vista 5)



12. Conclusiones

12.1 Conclusión general

El estudio permitió caracterizar de manera robusta la dinámica espacio-temporal de la Pudrición de Cogollo (PC) a nivel predial, demostrando que la intensidad de la enfermedad no se distribuye de forma aleatoria en el territorio, sino que presenta patrones espaciales estructurados y variables a lo largo del tiempo.

La aplicación integrada del Índice global de Moran y de los indicadores locales LISA, utilizando esquemas de vecindad por proximidad (KNN), permitió identificar periodos con autocorrelación espacial significativa, así como focos persistentes de alta intensidad (hotspots). Estos resultados constituyen evidencia cuantitativa que respalda la priorización espacial y temporal de intervenciones fitosanitarias, optimizando el uso de recursos en escenarios de cobertura parcial y predios dispersos.

12.2 Conclusiones específicas

12.2.1 Construcción de la base geoespacial

Se logró construir una base geoespacial consistente a nivel de predio y mes, integrando registros geolocalizados de enfermedad y geometrías prediales derivadas de puntos, con control de calidad de coordenadas y estandarización de sistemas de referencia. Este proceso permitió reducir errores espaciales y asegurar la coherencia entre los datos de campo y los insumos utilizados en el análisis espacial, constituyéndose en un insumo confiable para inferencia epidemiológica.

12.2.2 Comportamiento temporal de la enfermedad durante 2025

El análisis mensual evidenció que la dinámica de la PC presenta variabilidad temporal marcada, con meses en los que la enfermedad muestra mayor concentración espacial y otros en los que su distribución es compatible con un patrón aleatorio. Esto indica que la evolución temporal

de la PC no es homogénea y que los picos observados no siempre se acompañan de una estructura espacial definida, resaltando la importancia de integrar tiempo y espacio en el análisis.

12.2.3 Cálculo de la intensidad mensual normalizada

La definición y cálculo de la intensidad mensual de PC por predio, normalizada por palmas observadas, permitió generar un indicador comparable entre predios y meses, controlando el efecto del esfuerzo de monitoreo. Este enfoque evitó sesgos derivados de diferencias en cobertura y facilitó la interpretación epidemiológica de la recurrencia y carga operativa de la enfermedad.

12.2.4 Autocorrelación espacial global (Moran)

La estimación mensual del Índice global de Moran bajo vecindad KNN, evaluada mediante permutaciones, mostró que en la mayoría de los meses la intensidad de la PC presenta autocorrelación espacial positiva y estadísticamente significativa, lo que confirma la existencia de dependencia espacial. Sin embargo, también se identificaron meses sin significancia estadística, evidenciando que la estructura espacial de la enfermedad es dinámica y no permanente.

12.2.5 Autocorrelación espacial local (LISA)

El análisis LISA permitió localizar espacialmente los conglomerados que sustentan la autocorrelación global, clasificando los predios en clústeres Alto–Alto, Bajo–Bajo y valores atípicos espaciales. La presencia recurrente de clústeres Alto–Alto en varios meses confirma la

existencia de hotspots locales, mientras que los outliers espaciales evidencian heterogeneidad en el comportamiento sanitario entre predios cercanos.

12.2.6 Persistencia de hotspots y ranking de predios críticos

La cuantificación de la recurrencia de predios clasificados como Alto–Alto a lo largo del año permitió identificar hotspots persistentes, es decir, predios que concentran alta intensidad de PC de manera repetida en el tiempo. La construcción de un ranking de predios críticos proporciona una herramienta operativa para priorizar acciones de monitoreo intensivo, intervención temprana y seguimiento diferenciado.

12.2.7 Sensibilidad del esquema de vecindad

El análisis de sensibilidad comparando distintos valores del número de vecinos ($k=4$ y $k=6$) evidenció que los resultados globales y locales son estables en términos de signo, significancia y localización general de hotspots, lo que respalda la robustez del enfoque metodológico adoptado. No obstante, se confirma la necesidad de reportar explícitamente el esquema de vecindad utilizado, dado su impacto en la magnitud de los estadísticos y en el número de clústeres detectados.

12.3 Conclusión integradora

En conjunto, el estudio demuestra que la estadística espacial aplicada a datos epidemiológicos geolocalizados constituye una herramienta poderosa para comprender la

dinámica de la Pudrición de Cogollo en sistemas agrícolas reales, caracterizados por predios dispersos, cobertura parcial y monitoreo longitudinal.

La metodología propuesta es replicable, interpretable y directamente aplicable a la gestión fitosanitaria, al permitir pasar de diagnósticos descriptivos a decisiones basadas en evidencia espacial y temporal.

Aunque el análisis se realizó con información parcial para algunos predios y meses, los resultados obtenidos permiten identificar patrones espaciales y temporales relevantes. Adicionalmente, el esquema analítico desarrollado constituye una herramienta adaptable que podrá incorporar información futura de manera incremental, fortaleciendo la identificación de tendencias, la detección de focos persistentes y la priorización de acciones de monitoreo fitosanitario.

La posible ausencia de información en algunos predios puede influir en la estimación de los índices de autocorrelación espacial; sin embargo, este trabajo asume dicha condición como parte del contexto operativo real, destacando que el enfoque exploratorio permite identificar tendencias y patrones preliminares sin pretender inferencias definitivas. A medida que se consolide la información censal completa, los resultados podrán fortalecerse y refinarse sin modificar la estructura metodológica propuesta.

13 Recomendaciones

A partir de los resultados obtenidos en el análisis espacio-temporal de la Pudrición de Cogollo y considerando las limitaciones identificadas en la información disponible, se formulan las siguientes recomendaciones:

13.1 Revisión y control de la calidad de la información censal

Se recomienda fortalecer los procesos de revisión y control de calidad de la información recolectada mediante los censos sanitarios, con el fin de garantizar la consistencia, completitud y confiabilidad de los datos. Dado que los censos no siempre presentan cobertura total de los predios ni de todas las palmas en cada periodo, resulta necesario establecer protocolos de validación que permitan identificar errores de registro, inconsistencias temporales y posibles sesgos asociados a la cobertura del monitoreo.

13.2 Parametrización y validación de los resultados

Se sugiere parametrizar los resultados derivados de los datos censales mediante la definición de criterios y umbrales estadísticos que permitan confirmar la coherencia de los indicadores calculados, tales como tasas de incidencia, intensidad de enfermedad y número de eventos por unidad espacial y temporal. Este proceso facilitaría la detección de valores atípicos,

variaciones abruptas no explicadas y posibles errores de medición, contribuyendo a una interpretación más robusta de los resultados.

13.3 Automatización de los procesos de análisis

Se recomienda avanzar en la automatización de los procesos de depuración, integración, análisis y visualización de la información, empleando herramientas computacionales y lenguajes de programación estadística. La automatización de estos procesos permitiría reducir errores operativos, mejorar la reproducibilidad de los análisis y optimizar el manejo de grandes volúmenes de información generados en los censos periódicos.

13.4 Construcción de patrones integrales de revisión de datos

Se recomienda desarrollar patrones de revisión de la información que incorporen, además de los datos censales, variables contextuales relevantes, tales como el tipo de terreno, las precipitaciones, el año de establecimiento del cultivo y las condiciones agronómicas del predio. La inclusión de estas variables permitiría un análisis más integral del comportamiento espacial y temporal de la enfermedad, así como una mejor identificación de factores asociados al riesgo sanitario.

13.5 Incorporación de análisis espectral e imágenes multiespectrales

A mediano plazo, se recomienda la incorporación de herramientas de análisis espectral y el uso de imágenes multiespectrales, obtenidas mediante sensores remotos o vehículos aéreos no tripulados** para la detección temprana y posterior seguimiento del estado fitosanitario de los cultivos, tanto los pertenecientes a la asociación como cultivos externos. Estas herramientas permitirían identificar alteraciones fisiológicas en las palmas antes de que los síntomas sean visibles en campo, fortaleciendo las estrategias de monitoreo y control fitosanitario.

13.6 Ampliación de estudios en detección remota

Se sugiere desarrollar estudios adicionales orientados al uso de técnicas de detección remota†† y realizar comparaciones sistemáticas con los censos manuales, considerando criterios como costos operativos, tiempos de recolección de información y precisión de los resultados. Este tipo de análisis permitiría evaluar la viabilidad técnica y económica de complementar o sustituir parcialmente los censos tradicionales.

13.7 Diseño e implementación de modelos estadísticos

Se recomienda el diseño e implementación de modelos estadísticos que permitan analizar el desarrollo de la enfermedad, la efectividad de los censos y el impacto de las revisiones

†† Evaluación de Flecha Seca en palma aceitera (*Elaeis guineensis* Jacq.) mediante imágenes multiespectrales, Costa Rica. <https://www.redalyc.org/journal/437/43769732011/>

periódicas. Entre los modelos a considerar se incluyen modelos de supervivencia para analizar el tiempo hasta la aparición de la enfermedad y el tiempo de recuperación de las palmas, modelos longitudinales o de efectos mixtos para evaluar la evolución temporal considerando la variabilidad entre predios, y modelos espaciales y espacio-temporales para analizar la expansión de la enfermedad y la presencia de agrupamientos persistentes.

Adicionalmente, estos modelos pueden integrarse con análisis económicos que permitan contrastar los costos asociados al tratamiento de las palmas, incluyendo insumos químicos y mano de obra, con la evolución de la enfermedad, aportando información relevante para la optimización de recursos y la toma de decisiones en el manejo sanitario del cultivo.

Referencias Bibliográficas

- Anselin, L. (1988). *Spatial econometrics: Methods and models*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers.
- Anselin, L. (1995). *Local indicators of spatial association—LISA*. *Geographical Analysis*.
Obtenido de onlinelibrary wiley: <https://doi.org/10.1111/j.1538-4632.1995.tb00338.x>
- Anselin, L. (2002). Under the hood: Issues in the specification and interpretation of spatial regression models. *Agricultural Economics*, 27(3), 247–267.
- Anselin, L., Rey, S., & Li, W. (2020). PySAL: A Python library for spatial data science. *Journal of Statistical Software*, 92(1), 1–38.
- Campbell, C., & Madden, L. (1990). *Introduction to plant disease epidemiology*. John Wiley & Sons.
- Cliff, A., & Ord, J. (1981). *Spatial processes: Models & applications*. Pion.
- Congreso de la República de Colombia. (2009). *Ley 1273 de 2009*. Diario Oficial No. 47.223.
- Congreso de la República de Colombia. (2012). *Ley 1581 de 2012*. Diario Oficial No. 48.587.
- Congreso de la República de Colombia. (2014). *Ley 1712 de 2014*. Diario Oficial No. 49.084.
- Corley, R., & Tinker, P. (2015). *The Oil Palm* (Quinta ed.). John Wiley & Sons.
- Corporación Centro de Investigación en Palma de Aceite - Cenipalma. (2019). *Pudrición del cogollo de la palma de aceite (Elaeis guineensis) en Colombia*. Cenipalma.
- Cox, D. R. (1972). Regression models and life-tables. *Journal of the Royal Statistical Society: Series B*, 34(2), 187–220.
- Cressie, N. A. (1993). *Statistics for spatial data*. John Wiley & Sons.

Cuello, J. (2021). *Aplicación del programa cybertracker en el procesamiento de la información de cosecha en la empresa palmas DE.*

Federación Nacional de Cultivadores de Palma de Aceite - Fedepalma. (2011). *Censo nacional de palma de aceite Colombia 2011.*
<http://repositorio.fedepalma.org/handle/123456789/107598>

Federación Nacional de Cultivadores de Palma de Aceite - Fedepalma. (2025). *Anuario estadístico del sector palmero colombiano.*
<https://publicaciones.fedepalma.org/index.php/anuario/article/view/14468/14379>

Garrett, K. A. (2011). The effects of climate variability and the color of weather time series on agricultural diseases and pests, and decision making for their management. *Agricultural and Forest Meteorology*, 150(4), 524–534.

Getis, A., & Ord, J. (1992). The analysis of spatial association by use of distance statistics. *Geographical Analysis*, 24(3), 189–206.

Goodchild, M. F. (1986). *Spatial autocorrelation*. Geo Books.

Instituto Colombiano Agropecuario (ICA). (s.f.). *Sistema de vigilancia fitosanitaria y sanidad vegetal*. <https://www.ica.gov.co>

Isaaks, E., & Srivastava, R. (1989). *An Introduction to Applied Geostatistics*. New York: Oxford University Press.

Jeger, M. J. (1986). The potential of analytical epidemiology in plant disease research. *Annual Review of Phytopathology*, 24, 397–422.

Kleinbaum, D., & Moeschberger, M. (2003). *Survival analysis: Techniques for censored and truncated data* (2nd ed ed.). Springer.

LeSage, J., & Pace, R. (2009). *Introduction to spatial econometrics*. Boca Raton, FL: CRC Press.

- Madden, L., Hughes, G., & van den Bosch, F. (2007). *The study of plant disease epidemics*. APS Press.
- Montgomery, D. (2019). *Introduction to statistical quality control* (8th ed.). John Wiley & Sons.
- Moran, P. (1950). Notes on continuous stochastic phenomena. *Biometrika*, 37(1–2), 17–23.
- Presidencia de la República de Colombia. (2013). *Decreto 1377 de 2013*. Diario Oficial No. 48.83.
- Presidencia de la República de Colombia. (2015). *Decreto 1071 de 2015*. Diario Oficial No. 49.523.
- Rey, S., Anselin, L., Kang, W., Wolf, L., & Shao, H. (2023). The PySAL ecosystem for geospatial data science. *Geographical Analysis*, 55(1), 1–20.
- Valbuena, J. C. (2021). *Diseño de una plantilla con la herramienta Cybertracker para la captura de información de enfermedades en cultivos de palma africana de proveedores aliados a Palmas del Cesar S.A.* Bucaramanga.
- Wheeler, D., & Chambers, D. (2010). *Understanding statistical process control* (3 ed. ed.). SPC Press.